



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2020 30 stp

Fakultet for realfag og teknologi

Hovedveileder: Thomas Kringlebotn Thiis

Måling av fukt i historisk og moderne teglsteinsfasade ved aktiv og passiv termografering

Active and Passive Thermography for Moisture

Detection in Historic and Modern Masonry Façade

Håkon Martiniussen Sylliaas

Byggeteknikk og arkitektur

Fakultet for realfag og teknologi

Forord

Denne masteroppgaven markerer slutten på veien mot å bli sivilingeniør ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Masteroppgaven er en utvidelse av bachelorgraden i byggdesign fra Universitetet i Agder (UIA).

Oppgaven er på 30 studiepoeng, skrevet og levert våren 2020. Oppgaven omhandler fuktmålinger i en historisk teglstensfasade lokalisert ved St. Olavs Vold i Sarpsborg utført ved hjelp av aktiv termografering, og fuktkartlegging på KA-bygget ved NMBU i Ås ved hjelp av passiv termografering.

Jeg ønsker å takke veilederen min ved NMBU, Thomas Kringlebotn Thiis, for god veiledning og oppfølging gjennom arbeidet med oppgaven. Videre vil jeg takke masterstudent Martine Antonsen for samarbeid og diskusjoner på tvers av oppgavene gjennom arbeidet med denne masteroppgaven.

Helt til slutt vil jeg takke familie og venner som har oppmuntret og støttet meg gjennom et 5-årig langt arbeid med å fullføre studiene.

Ås, Mai 2020



Sylliaas, Håkon Martiniussen

Sammendrag

Den store mengden med bygg konstruert av teglsten og treverk i Norge gjør at en ikke-destruktiv metode for å kunne kartlegge fuktnivået i fasader er veldig aktuelt. Utviklingen av metoder for å kunne kartlegge fukt ved hjelp av ikke-destruktive metoder som infrarød termografering vil bidra til å enklere kartlegge fasader uten å benytte destruktive metoder. De forventede klimaendringene med mer nedbør gjør at bevaringen, kartleggingen av vedlikeholdsbehov og måling av fukt i bygninger blir mer aktuelt.

Kartlegging av fuktnivå i denne oppgaven er utført ved hjelp av aktiv termografering ved St. Olavs vold ved Borgarsyssel Museum i Sarpsborg og passiv termografering på KA-bygget ved NMBU i Ås. Arbeiderboligen ved St. Olavs Vold er oppført i 1840-årene og er i dag en fredet bygning konstruert i teglstein. KA-bygget representerer en mer moderne teglstein, fasaden har også stor synlig slitasje.

Aktiv og passiv termografering ble benyttet for å beregne fuktnivået i fasadene for å kunne utføre en validering av ikke-destruktiv feltmåling i teglsteinsfasader. Resultatene ble benyttet til å regne ut punktmålinger av fuktnivå og utarbeiding av fuktkart.

Resultatene i denne oppgaven viser at verdiene for fuktnivået varierer. De teoretiske fuktverdiene samsvarer med resultatene innhentet med aktiv termografering. Teglstein er et lite hygroskopisk materiale, til tross for dette er det målt fuktverdier opp til 40% i denne oppgaven. Aktiv termografering ved sterk direkte solstråling gir ugyldige resultater, målingene viste opp mot 100% fukt i veggen. Resultatene ved passiv termografering gir høye fuktverdier, opp mot 100% fukt i henhold til den teoretiske modellen benyttet i denne oppgaven.

Abstract

The large amount of buildings constructed of bricks and wood in Norway means that a non-destructive method for moisture mapping is very relevant. The development of methods to easily detect moisture using non-destructive methods such as infrared thermography will make it possible to map moisture more simply without using destructive methods. The expected climate changes make the conservation, maintenance and moisture mapping of buildings relevant.

The moisture mapping in this thesis was carried out using active thermography at St. Olavs Vold at Borgarsyssel museum in Sarpsborg and passive thermography at the KA-building at NMBU in Ås. The building in Sarpsborg was constructed in the 1840s and is a listed building made by bricks. The KA-building represents a more modern brick, and the façade has great visible tearing.

Active and passive thermography is used to obtain data to calculate the moisture level in the facades to perform a validation of a non-destructive in-situ measurement of moisture in brick facades. The results were used to calculate the moisture level in points and mapping of the wall.

The results in this thesis show that the moisture level obtained in-situ varies. The theoretical model correspondent with the results obtained with active thermography. Brick is not a very hygroscopic material, but despite this is the moisture levels from the in-situ test as high as 40%. Direct sunlight during the active thermography is an error source, the moisture values obtained in direct sunlight are as high as 100%. Results obtained with passive thermography provides high moisture values, up to 100% according to the theoretical model used for the passive thermography.

Innholdsfortegnelse

Forord	III
Sammendrag	V
Abstract	VII
Innholdsfortegnelse	VIII
Figurliste	X
Tabelliste	XII
1 Innledning	1
1.1 Problemstilling.....	1
1.2 Bakgrunn	1
2 Teori	2
2.1 Ikke-destruktiv testing.....	2
2.1.1 Nøyaktigheten til ikke-destruktiv testing	2
2.1.2 Termografering.....	3
2.2 Måling av fukt i materialer	4
2.2.1 Absolutt fuktinnhold i materialer	4
2.3 Nedbryting av byggematerialer.....	4
2.3.1 Frostspreng i materialer	4
2.3.2 Råte- og fargeskadesopp.....	5
2.4 Teglsteinsfasade	5
2.5 Fukt og varmetransport.....	6
2.5.1 Fuktopptak i materialer	6
2.5.2 Luftfuktighet og duggpunkt.....	6
2.5.3 Kapillær metningsgrad	7
2.5.4 Slagregn.....	8
2.5.5 Varmetransport i materialer	9
2.6 Termisk stråling	12
2.6.1 Temperaturmåling ved Infrarødt kamera	14
2.7 Termisk fuktfaktor	16
3 Utstyr og programvare	18
3.1 Infrarødt kamera	18
3.2 Optris PIX connect	18
3.3 Fiji	19
3.4 Håndholdte fuktmålere	19
3.5 Apogee pyranometer	20

4	Metode	21
4.1	Lokasjoner for feltforsøk	21
4.2	Datainnhenting.....	21
4.2.1	Fuktmålinger.....	22
4.2.2	Aktiv Termografering.....	22
4.2.3	Passiv termografering.....	25
4.3	Behandling av data	26
4.3.1	Termografering.....	26
4.3.2	Beregning av termisk fuktfaktor.....	26
4.3.3	Fuktkart	26
4.3.4	Teoretisk termisk fuktfaktor.....	27
5	Resultat	29
5.1	Aktiv termografering av historisk teglsteinsfasade.....	29
5.1.1	Vegg 1 – Nord	30
5.1.2	Vegg 2 – Øst.....	35
5.1.3	Vegg 3 – Vest	40
5.1.4	Vegg 4 - Nord.....	45
5.1.5	Sammenstilling av håndholdte målinger	50
5.2	Passiv termografering av moderne teglsteinsfasade	51
6	Diskusjon	57
6.1	Aktiv termografering	57
6.2	Passiv Termografering.....	60
7	Konklusjon	61
7.1	Videre arbeid	61
8	Referanser	62
9	Vedlegg	66
9.1	Termisk effusivitet.....	66
9.2	Teoretisk termisk fuktfaktor.....	66
9.2.1	Historisk teglstein St. Olavs Vold	66
9.2.2	Teglstein KA-bygget.....	67
9.3	Sorpsjonskurve historisk teglstein.....	68

Figurliste

Figur 2.1-1: Illustrasjon aktiv termografering, modifisert fra (Georges et al., 2018)	3
Figur 2.4-1: Sorpsjonskurve for historisk teglstein (Fraunhofer-IBP - Holzkirchen).....	5
Figur 2.5-1: Varmetransport, $T_1 > T_2$. Modifisert fra (Çengel et al., 2015)	9
Figur 2.6-1: Elektromagnetiske spekteret	12
Figur 2.6-2: Stråling registrert av et infrarødt kamera (Usamentiaga et al., 2014).	14
Figur 3.2-1: Illustrasjon av brukergrensesnittet i Optris PIX connect	18
Figur 4.1-1: (a) - Plassering til St. Olavs vold ved Borgarsyssel museum, (b) - Plassering til KA-bygget i ved NMBU	21
Figur 4.2-1: Oppsett for aktiv termografering.....	22
Figur 4.2-2: Skisse av oppsett for aktiv termografering.	23
Figur 4.3-1: Teoretisk termisk fuktfaktor-kurve for historisk tegl.....	27
Figur 4.3-2: Teoretisk termisk fuktfaktor-kurve for tegl	28
Figur 5.1-1: Lokasjoner for aktiv termografering utført ved St Olavs Vold. Modifisert figur utgitt av (museum)	29
Figur 5.1-2: Dronesanning av St. Olavs Vold, Borgarsyssel museum (museum).	29
Figur 5.1-3: (a) - Visuelt bilde vegg 1, (b) - Temperatur før oppvarming	30
Figur 5.1-4: (a) - Start nedkjøling av vegg 1 aktiv termografering, (b) - Slutt nedkjøling av vegg 1 aktiv termografering	30
Figur 5.1-5: Temperaturendringen ved aktiv termografering vegg 1	31
Figur 5.1-6: Fuktkart vegg 1 ved aktiv termografering.....	31
Figur 5.1-7: Fuktkart for vegg 1 - Nord.....	32
Figur 5.1-8: Punktmålinger uført på vegg 1.....	33
Figur 5.1-9: Håndholdte fuktmålere mot termisk fuktfaktor – vegg 1.....	34
Figur 5.1-10: (a) - Visuelt bilde vegg 2, (b) - Temperatur før oppvarming	35
Figur 5.1-11: (a) - Start nedkjøling av vegg 2 aktiv termografering, (b) - Slutt nedkjøling av vegg 2 aktiv termografering	35
Figur 5.1-12: Temperaturendringen ved aktiv termografering vegg 2	36
Figur 5.1-13: Termisk fuktfaktor-kart vegg 2 ved aktiv termografering.....	36
Figur 5.1-14: Fuktkart vegg 2 - Øst	37
Figur 5.1-15: Plassering av punktmålinger uført på vegg 2.....	38
Figur 5.1-16: Håndholdte fuktmålere mot termisk fuktfaktor - vegg 2.....	39
Figur 5.1-17: (a) - Visuelt bilde vegg 3, (b) - Temperatur før oppvarming	40
Figur 5.1-18: (a) - Start nedkjøling av vegg 3 aktiv termografering, (b) - Slutt nedkjøling av vegg 3 aktiv termografering	40
Figur 5.1-19: Temperaturendringen ved aktiv termografering vegg 3	41
Figur 5.1-20: Termisk fuktfaktor vegg 3 ved aktiv termografering.	41
Figur 5.1-21: Fuktkart for vegg 3 – Vest	42
Figur 5.1-22: Plassering av punktmålinger uført på vegg 3.....	43
Figur 5.1-23: Håndholdte fuktmålere mot termisk fuktfaktor vegg 3.....	44
Figur 5.1-24: (a) - Visuelt bilde vegg 4, (b) - Temperatur før oppvarming	45
Figur 5.1-25: (a) - Start nedkjøling av vegg 4 aktiv termografering, (b) - Slutt nedkjøling av vegg 4 aktiv termografering	45
Figur 5.1-26: Temperaturendringen ved aktiv termografering vegg 4	46
Figur 5.1-27: Temperaturendringen ved aktiv termografering vegg 4	46
Figur 5.1-28: Fuktkart vegg 4 – Nord.....	47
Figur 5.1-29: Plassering av punktmålinger uført på vegg 4.....	48

Figur 5.1-30: Håndholdte fuktmålere mot termisk fuktfaktor vegg 4.....	49
Figur 5.1-31: Håndholdte fuktmålinger mot målt termisk fuktfaktor.....	50
Figur 5.2-1: Bilde av KA-bygget (Earth).	51
Figur 5.2-2: Visuell illustrasjon av sør-øst vegg KA-bygget ved NMBU	51
Figur 5.2-3: Termografering utført kl. 05:25. Start passiv termografering.	52
Figur 5.2-4: Termografering utført kl 12:00. Slutt passiv termografering.....	52
Figur 5.2-5: Temperaturendringen til fasaden under passiv termografering.	53
Figur 5.2-6: Termisk fuktfaktor-kart ved passiv termografering.....	53
Figur 5.2-7: fuktkart for vegg KA-bygget	54
Figur 5.2-8: Plassering av punktmålinger ved passiv termografering.....	55
Figur 5.2-9: Meteorologiske data for passiv termografering (Yr.no, 2020).	56
Figur 6.1-1: Nedkjøling i tilknytning til bakken – vegg 2.	58
Figur 6.1-2: Forstyrrelser i termisk fuktfaktor-kart.	59

Tabelliste

Tabell 2.5-1: Klimasoner, kategorier slagregnsbelastning (Kvande, 2007)	8
Tabell 2.5-2: Nedbørsdata utvalgte steder (Kvande et al., 2013)	8
Tabell 2.5-3: Varmekonduktivitet for et utvalg byggematerialer (Young & Freedman, 2015).	10
Tabell 2.5-4: Spesifikk varmekapasitet for et utvalg byggematerialer.....	10
Tabell 2.5-5: Termisk diffusivitet for noen vanlige byggematerialer (Madsø, 2001).	10
Tabell 2.5-6: Varmeovergangsmotstand i henhold til NS-EN ISO 6946	11
Tabell 2.6-1: Emissivitet for forskjellige materialer (Baehr & Stephan, 2011).....	13
Tabell 3.1-1: Teknisk data Optris PI 640 (Optris, 2014).....	18
Tabell 3.4-1: Grenseverdier Mastech MS6900 (Mastech, 2017)	19
Tabell 3.4-2: Grenseverdier fuktmåler CM (Biltema, 2017).	19
Tabell 4.1-1: Koordinater lokasjoner for feltforsøk.....	21
Tabell 4.2-1: Utstyr for feltforsøk.....	22
Tabell 4.2-2: Avstander og utførelsestid under feltforsøk	23
Tabell 4.2-3: Data - feltforsøk.....	24
Tabell 4.2-4: Utstyr passiv termografering.....	25
Tabell 4.2-5: Teststed passiv termografering.....	25
Tabell 4.3-1: Materialeegenskaper benyttet i utregning av teoretisk termisk fuktfaktor.	27
Tabell 5.1-1: Verdier punktmålinger utført vegg 1.....	33
Tabell 5.1-2: Solmåling utført ved aktiv termografering vegg 1	34
Tabell 5.1-3: Punktmålinger utført vegg 2.....	38
Tabell 5.1-4: Solmåling utført ved aktiv termografering vegg 2	39
Tabell 5.1-5: Punktmålinger utført vegg 3.....	43
Tabell 5.1-6: Solmåling utført ved aktiv termografering vegg 3	44
Tabell 5.1-7: Punktmålinger utført vegg 4.....	48
Tabell 5.1-8: Solmåling utført ved aktiv termografering vegg 4	49
Tabell 5.2-1: Punktmålinger utført ved passiv termografering.....	55
Tabell 5.2-2: Solmåling utført kl.1200 for passiv termografering.	56

1 Innledning

1.1 Problemstilling

Problemstillingen for denne oppgaven er:

Validering av ikke-destruktiv feltmåling av fukt i teglsteinsfasader ved hjelp av termografering

Det er benyttet to valideringscase; en historisk teglsteinsbygning fra 1840 og en moderne teglforblending.

For å kunne svare på problemstillingen er det utarbeidet følgende delspørsmål:

- Hvor nøyaktig er måling av fukt ved termografering?
- Er det noen forskjell på nøyaktigheten ved passiv og aktiv termografering?
- Hvor egnet er en ikke-destruktiv måling av fukt i fasader ved hjelp av termografering?

For å svare på dette er feltforsøk utført på en historisk teglsteinsfasade ved Borgarsyssel museum og KA-fasaden ved NMBU i Ås.

1.2 Bakgrunn

Den store mengden med bygg konstruert av teglsten og treverk i Norge gjør at en ikke-destruktiv metode for å kunne kartlegge fuktnivået i fasader er aktuelt. Utviklingen av metoder for enkelt å kunne kartlegge fukt ved hjelp av ikke-destruktive metoder som infrarød termografering, vil bidra til å enklere kartlegge fasader uten å benytte destruktive metoder.

Nedbørmengden i Norge har økt betraktelig siden starten av 1900-tallet, og estimerer gjort av metrologisk institutt anslår at nedbøren vil øke med 10 til 20 prosent mot slutten av dette århundret, avhengig av forurensningsnivået i verden (Meteorologisk_institutt, 2017). Klimaendringene med varmere vær og mer nedbør gjør at kartlegging av fuktnivå i fasader blir enda mer aktuelt.

Høye fuktnivåer i fasader kan forårsake skader som frostspreng og råte- og fargeskader. Ikke-destruktiv testing er godt egnet til å kartlegge tilstanden og planlegging av vedlikehold og rehabilitering av fasader.

2 Teori

Delkapitlene omhandler teori om ikke-destruktiv testing, måling av fukt i materialer, termisk fuktfaktor, nedbrytning av materialer, teglsteinsfasade, mekanismer rundt fukt og varmetransport og termisk stråling.

2.1 Ikke-destruktiv testing

Ikke-destruktiv testing er definert av the American Society for Nondestructive Testing (ASNT) en prosess hvor en tester, inspiserer, evaluerer og vurderer objekter uten å påvirke evnen til å utføre objektets tiltenkte funksjon (testing, 2020). Metodene muliggjør testing av materialer som er i bruk, i motsetning til destruktive tester som krever et utvalg av materialer som representerer materialet som skal undersøkes (testing, 2020). Ikke-destruktiv testing omfatter et bredt spekter av begrep og tester. Variasjonen i tester og begrep tilpasses etter hvilket mål og applikasjon som er ønsket (Shull, 2001).

Ikke-destruktiv testing omfatter et bredt spekter av prøvetyper og metoder (ndt.no; testing, 2020), hvor magnetpulver prøving (MT), penetrant prøving (PT), radiografisk prøving (RT), ultralyd prøving (UT), virvelstrøm prøving (ET) og visuell prøving (VT) er de mest benyttede (ndt.no; testing, 2020). I tillegg finner man mindre benyttede metoder, som bruk av infrarød termografering (testing, 2020). Valg av metode forutsetter en grunnleggende kunnskap om hva som skal undersøkes, sett i sammenheng med ønskede resultater (Shull, 2001).

2.1.1 Nøyaktigheten til ikke-destruktiv testing

Ikke-destruktiv testing kan påvirkes av flere faktorer, alle metodene krever personer med kompetanse innen det fagfeltet det skal utføres testing (Shull, 2001).

Utførelsen av ikke-destruktiv testing ute i felt gjør at resultatene blir påvirket av ytre faktorer, dette krever at blant annet lysforhold og temperaturforhold må vurderes og kompenseres under testing (Shull, 2001). Operatøren av den ikke-ødeleggende testen må også ha friheten til å operere som ønsket ved utførelsen for å kunne minimere feilkildene til testene (Shull, 2001).

Kort oppsummert er det tre punkter som påvirker ikke-destruktiv testing (Shull, 2001):

1. Personlige egenskaper; fysiske og mental tilstand.
2. miljø; lysforhold mm.
3. Eksterne faktorer; resultatene kan påvirkes og påvirke andre interesser.

2.1.2 Termografering

Infrarød termografering eller IRT er en ikke-destruktiv metode som tilbyr et bredt spekter innen testing, evaluering og undersøkelser av konstruksjoner og materialer (Avdelidis & Moropoulou, 2004). Infrarød termografering baseres på målinger av utstrålt varmeenergi fra gjenstander eller materialer. Ujevnheter i overflaten vil resultere i temperaturdifferanser, som blir målt sammen med reflektert energi i omgivelsene av sensorene i et infrarødt kamera (Kylili et al., 2014).

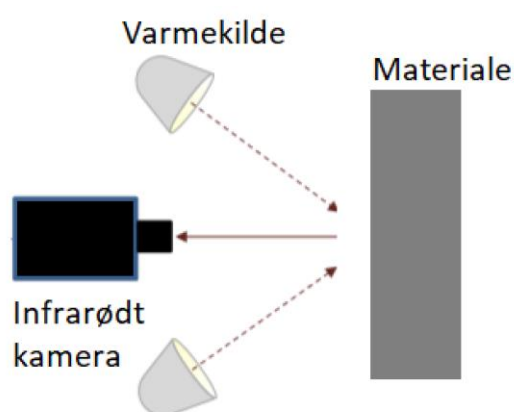
Ikke-destruktiv testing ved hjelp av termografering deles opp i to hovedkategorier, aktiv og passiv termografering (Kylili et al., 2014). Aktiv termografering er den vanligste metoden å utføre ikke-ødeleggende testing ved hjelp av infrarød termografering (Usamentiaga et al., 2014).

Passiv og aktiv termografering kan benyttes til kartlegging i et bredt spekter, fra fuktundersøkelser av jord (Schwarz et al., 2018) til karlegging av fukt i bygninger (Barreira & Almeida, 2019; Ludwig et al., 2004).

Anvendelsen av aktiv termografering innebærer at energi tilføres prøven eller materialet som skal undersøkes. Tilføringen av varme er en kvantitativ metode som brukes for å undersøke de termiske varmebølgene i materialet (Poblete & Acebes Pascual, 2007). Prinsippet bak aktiv termografering er illustrert i figur 2.1-1. Aktiv termografering deles inn i «pulsed thermography» og «lock-in Thermography» (Kylili et al., 2014).

1. Pulsed thermography (PT): varmekilde, gjerne lamper, som skaper umiddelbar oppvarming. Dette blir målt over en gitt tidsperiode i det gitte området (D'Accardi et al., 2018).
2. Lock-in thermography (LT): Periodisk påføring av energi mot valgt legeme (Breitenstein et al., 2018).

Passiv termografering benyttes ved måling av den termiske utstrålingen fra et legeme hvor det ikke påføres ekstern varme, materialene som undersøkes må ha forskjellig temperatur for at denne metoden skal brukes. Passiv termografering kan for eksempel benyttes til å undersøke fukt på innsiden av panel i fly (Usamentiaga et al., 2014).



Figur 2.1-1: Illustrasjon aktiv termografering, modifisert fra (Georges et al., 2018)

2.2 Måling av fukt i materialer

Måling av fukt deles av SINTEF byggforsk inn i tre typer. Måling av forskjeller i absolutt fuktinnhold ved hjelp av fuktindikator, måling av materialets absolutte fuktinnhold ved hjelp av trefuktmåler eller tørke/veie-metoden og måling av det relative fuktnivået i lufta ved hjelp av en RF-måler (Holøs, 2015). Nøyaktigheten til de forskjellige metodene varierer, hvor tørke/veie-metoden er den mest nøyaktige metoden for å måle fukten i materialer (Holøs, 2015).

Alle de tre metodene kommer med sine begrensninger. De fleste av metodene for måling av fukt medfører uttak av prøver eller boring av hull i materialene (Høla, 2017; Holøs, 2015). Metodene som krever uttak av prøver eller hulltaking i materialene kategoriseres som destruktive metoder, materialene får redusert sin evne til å utføre sin tiltenkte funksjon (testing, 2020). Bruken av ikke-destruktive metoder for å måle fukt gjør at uttak og boring av hull i vegger blir overflødig. Nøyaktigheten til ikke-destruktive metoder er fortsatt under utvikling (Høla, 2017)

2.2.1 Absolutt fuktinnhold i materialer

Den mest presise måten å bestemme fuktinnholdet i materialer er ved hjelp av tørking og veiing (Geving & Thue, 2002). Tørking av materialer ved 105°C gjøres på materialer som ikke endrer struktur ved denne temperaturen. Mineralske materialer tåler oppvarming til 105°C, andre materialer som gips vil ikke tåle oppvarmingen (Geving & Thue, 2002). Materialer som ikke tåler oppvarming til 105°C bør tørkes ved lavere temperaturer over en lengre tidsperiode (Holøs, 2015). Det absolutte fuktnivået kan utregnes etter tre målinger av vekt med 24 timers mellomrom hvor vektendringen har vært under 0,1% av total masse. Vekten til prøvematerialene skal for å oppnå høy nøyaktighet overstige 100 gram (Geving & Thue, 2002). Metoden for å regne ut absolutt fuktnivå er bestemt etter NS-EN ISO 12570 (Standard Norge, 2000). Formelen for å utregne absolutt fuktnivå er presentert i formel 1

$$\text{Absolutt fuktnivå} = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100\% \quad (1)$$

Hvor m_w = masse våt prøve og m_0 er masse av tørr prøve

2.3 Nedbryting av byggematerialer

Bygninger vil før eller siden få skader relatert til fukt i Norge (Holme & Geving). SINTEF byggforsk anslår at 76% av de prosessforårsakede byggskadene kommer fra fuktpåvirkning og 66% av de prosessforårsakede byggskadene er i tilknytning til bygningens klimaskjerm (Kvande & Lisø, 2010). Prosessforårsakede byggskader innebærer skader som oppstår utenfor akseptert slitasje innenfor levetiden til materialet (Kvande & Lisø, 2010). Frostspreng og råte- og fargeskadesopp, med deres påvirkning presenteres under.

2.3.1 Frostspreng i materialer

Frostsprengning oppstår som en følge av at vann utvider seg ved overgang fra flytende til fast form. Volumutvidelsen til vann på 9% gjør at mekanisk nedbrytning oppstår ved vann i porer og sprekker (Sørbel, 2009). Frostsprengning er mest effektiv ved temperaturer under -5°C, hvor alt vann har frosset (Sørbel, 2009). Frostspreng påvirkes av flere materialfaktorer; Porøsitet, fordelingen av porestørrelser i materialet, permeabilitet, styrke og aldring (Jacobsen, 1999).

Frostspreng står i sammenheng med kapillær metningsgrad (kapittel 2.5.3) og den kritiske vannmetningsgraden. Den kritiske vannmetningsgraden er grenseverdien for hvor høy kapillær vannmetningsgrad det kan være før det oppstår skade ved frysing (Jacobsen, 1999).

2.3.2 Råte- og fargeskadesopp

Råte- og fargeskadesopp oppstår som følge av fukt over tid i materialer. Før råte- og fargeskadesopp angriper konstruksjonen vil i de aller fleste tilfeller observere angrep av muggsopp på materialene (Magnussen, 2007). Muggsopp er ofte faktoren som bestemmer omfanget av nødvendig utbedring av konstruksjon, bygning eller materiale (Magnussen, 2007).

Råte- og fargeskadesopp vokser best på fuktnivåer på 30-50 vektprosent, men råtesopp kan også utvikle seg ved 20 vektprosent fukt. Råte- og fargeskadesopp trives best i temperaturer mellom 25-30 °C. Høye temperaturer vil drepe råte- og fargeskadesopp, ved lave temperaturer overlever derimot soppen (Magnussen, 2007).

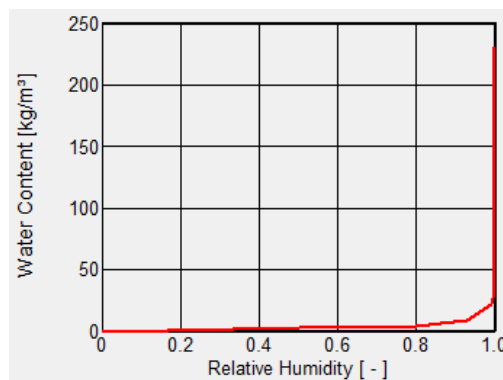
Typiske tegn på skader varierer. Misfarging, lukt og svekkelser etter råtesoppangrep er de sikreste tegnene. Ytterveggkonstruksjoner og andre utvendige konstruksjoner av tre er vanlige angrepspunkter for råtesopp (Magnussen, 2007).

2.4 Teglsteinsfasade

Teglstein er et gammelt byggemateriale i Norge. Teglstein har blitt brukt til å bygge konstruksjoner i Norge helt fra 1100-tallet. Produksjon av teglstein kom i gang i en større skala i Norge fra midten av 1700-tallet (Edvardsen, 2016). SINTEF byggforsk anslår at nærmere 600 000 bygg i Norge som er konstruert før 1900 har konstruksjon basert på mur og treverk eller konstruert med leire og andre jordarter (Edvardsen, 2017). Den store mengden bygg oppført sik, gjør at en ikke-destruktiv og mindre ødeleggende metoder er fordelaktige i prosessen ved å kartlegge, overvåke tilstanden og følge med på utviklingen til fasader (Maierhofer et al., 2006).

Teglstein produseres av leire som bearbeides, formes, tørkes og brennes. Dagens teglstein har dimensjonene 226mm x 104mm x 60 mm (Edvardsen, 2016).

Tegl har god varmelagringsevne, den spesifikke varmekapasiteten er i størrelsesordenen 830 Ws/(kgK) (Hisdal & Kvande, 2011). Norsk tegl har moderat fuktoppsug, fuktoppsuget er på mellom 1,0 og 2,5 kg/m²min (Hisdal & Kvande, 2011). Tegl er lite hydroskopisk og opptar lite fukt fra omgivelsene rundt. Likevekten til fukten i tegl er derfor lav sammenlignet med andre bygningsmaterialer (Hisdal & Kvande, 2011). Vannabsorpsjonen ligger på 10% for teglstein (Edvardsen & Ramstad, 2014). Figur 2.4-1 viser sorpsjonskurven for en historisk teglstein fra 1500 tallet (Fraunhofer-IBP - Holzkirchen). Sorpsjonskurve med absolutt fuktnivå er presentert i vedlegg 9.3. Sorpsjonskurven for teglstein varierer for forskjellige typer teglstein.



Figur 2.4-1: Sorpsjonskurve for historisk teglstein (Fraunhofer-IBP - Holzkirchen).

2.5 Fukt og varmetransport

Dette kapitlet tar for seg relevante temaer innen fukt og varmetransport benyttet i denne oppgaven.

2.5.1 Fuktopptak i materialer

Fukt i materialer betegner som regel andelen vann i porer og hulrom som kan opptas eller avgis til omgivelsene. Mange byggematerialer er hygroskopiske, det vil si at fuktnivået i materialene varierer med omgivelsene rundt. De materialene som ikke er hygroskopiske har lukket poresystem, som metaller, glass og naturstein. Fuktnivået i materialer oppgis som absolutt fuktinnhold eller relativ luftfuktighet for porene i materialene (Edvardsen & Ramstad, 2014).

Fuktinnholdet i et porøst materiale går mot et konstant nivå avhengig av den relative fuktigheten i luften. Denne verdien er likevektsfuktigheten ved den gitte relative luftfuktigheten. Ut fra likevektsfukten har det blitt utarbeidet sorpsjonskurver for hvordan materialer opptar og avgir fukt (Bøhlerengen, 2018). Fuktkapasiteten til materialer angir materialets evne til endringer i fuktinnholdet i materialet. Lav fuktkapasitet angir at materialet ikke tar opp store fuktmengder ved endring i relativ luftfuktighet (Geving & Thue, 2002). Treverk har høyere fuktkapasitet enn tegl, treverk påvirkes derfor i mye større grad av varierende relativ luftfuktighet enn tegl (Geving & Thue, 2002).

Fukttransport i materialer forekommer som flere prosesser, dampform og væskeform. Hvis fuktnivået overstiger det hygroskopiske maksimum vil fukttransporten være i væskeform (Bøhlerengen, 2018). Fukttransporten i dampform opptrer hovedsakelig i to former. Diffusjon hvor vanddamp beveger seg fra områder med høyt trykk til områder med lavt trykk og ved luftlekkasjer hvor dampen transporteres i luft, kalt effusjon (Bøhlerengen, 2018; Edvardsen & Ramstad, 2014). Fukttransport i væskeform opptrer i flere former. De vanligste formene er lekkasjer gjennom åpninger, vannovertrykk, vindtrykk (slagregn) og kapillære krefter i materialer (Bøhlerengen, 2018). Kapillære krefter gjør at materialer i kontakt med vann suger opp vann. Dette oppstår gjerne i materialer som er i direkte nærhet til vann fra grunnen (Bøhlerengen, 2018).

2.5.2 Luftfuktighet og duggpunkt

Luften holder alltid på fuktighet. Fuktigheten forekommer som usynlig vanddamp i luften, som angis som vanddampinnhold og vanddamptrykk. Fuktinnholdet i luft oppgis ofte som relativ fuktighet (Edvardsen & Ramstad, 2014). Relativ fuktighet angir forholdet mellom fukt i luften og luftens totale fuktkapasitet, formel 2 presenterer uttrykket for relativ fuktighet. Relativ luftfuktighet oppgis sammen med temperaturen til luften, ettersom luftens totale fuktkapasitet henger sammen med lufttemperaturen (Edvardsen & Ramstad, 2014).

$$RF = \frac{v}{v_{sat}} * 100\% \quad (2)$$

Hvor v er vanddampinnholdet i luften og v_{sat} er mettet vanddampinnhold.

lufttemperaturen påvirker luftens evne til å holde på fuktighet. Den øvre fuktgrensen til luften kalles duggpunkt. Duggpunktet oppstår ved relativ fuktighet på over 100%. En økning av temperatur vil øke luftens kapasitet til å holde på fukt, ved en reduksjon i temperatur vil kapasiteten reduseres. Ved duggpunktet vil det oppstå kondens i luften eller på materialoverflater (Bøhlerengen, 2018). Duggpunktstemperaturen (t_d) er definert som den temperaturreduksjonen som må oppstå for at luften skal bli mettet, i en isobar prosess (konstant trykkreduksjon). Formel 3 uttrykkes ved hensyn til damptrykket (Lawrence, 2005).

$$e_s(t_d) = e(t) \quad (3)$$

For å kunne uttrykke duggpunktstemperaturen med hensyn til den relative fuktigheten i luften er et uttrykk for e_s avhengig av temperaturen nødvendig. Formel 4, kjent som August-Roche-Magnus formelen gir sammenhengen. Formel 4 er en empirisk formen med god nøyaktighet (Lawrence, 2005).

$$e_s = C_1 \exp\left(\frac{A_1 t}{B_1 + t}\right) \quad (4)$$

Hvor $A_1 = 7,625$, $B_1 = 243,5$ og $C_1 = 610,94$ (Lawrence, 2005). Formelen gir verdier for e_s med en treffsikkerhet på $<0,4\%$ i temperaturspenet -40°C til 50°C (Lawrence, 2005).

Formel 5 viser kombinasjonen av formel 3 og formel 4 for å beregne duggpunktstemperaturen (Lawrence, 2005).

$$t_d = \frac{B_1 \ln\left(\frac{e}{C_1}\right)}{A_1 - \ln\left(\frac{e}{C_1}\right)} \quad (5)$$

Kombinert med formel 3 gir dette formel 6 for duggpunktstemperaturen med hensyn til den relative fuktigheten (Lawrence, 2005; Thiis et al., 2017).

$$t_d = \frac{B_1 \left[\ln\left(\frac{RF}{100}\right) + \frac{A_1 t}{B_1 + t} \right]}{A_1 - \ln\left(\frac{RF}{100}\right) - \frac{A_1 t}{B_1 + t}} \quad (6)$$

2.5.3 Kapillær metningsgrad

Den oppfuktningen som oppstår for et materiale ved direkte kontakt med vann skaper en kapillær metningsgrad. Den kapillære metningsgraden angis som en verdi mellom 0 og 1, hvor 1 angir at materialet er helt kapillært mettet (Geving & Thue, 2002). En kapillært mettet prøve oppnås ved at et prøvestykke senkes i vann etter nedtørking og tas ut ved likevekt (Geving & Thue, 2002). Formelen for å utregne kapillær metningsgrad er oppgitt i formel 7.

$$\text{Kapillær metningsgrad (S)} = \frac{m_w - m_0}{m_{cap} - m_0} * 100\% \quad (7)$$

Hvor m_{cap} = masse av kapillært mettet prøve (Geving & Thue, 2002). Den kritiske metningsgraden (S_{cr}), er punktet hvor frostspreng vil oppstå (Jacobsen, 1999).

2.5.4 Slagregn

Nedbør som drives mot fasader med hjelp av vind defineres som slagregn. Slagregn er en av de største grunnene til slitasje på yttervegger i Norge (Larsen, 2008). Slagregn kan gjøre stor skade ettersom tyngdekraften, trykkforskjeller, kapillær suging og bevegelsesenergi kan oppstå på en fasade hvor det er slagregn som forsterker effekten og gjør at vann kan trenge inn i deler av ytre del av fasaden og videre inn i veggen (Edvardsen & Ramstad, 2014; Larsen, 2008).

Slagregnsmengden er forskjellig fra landsdel til landsdel, hvor det deles inn i tre hovedgrupper for slagregnsbelastningen (Kvande, 2007). Tabell 2.5-1 oppgir inndelingen etter av slagregnsbelastningen og tabell 2.5-2 presenterer slagregnsbelastning for noen utvalgte steder.

Tabell 2.5-1: Klimasoner, kategorier slagregnsbelastning (Kvande, 2007)

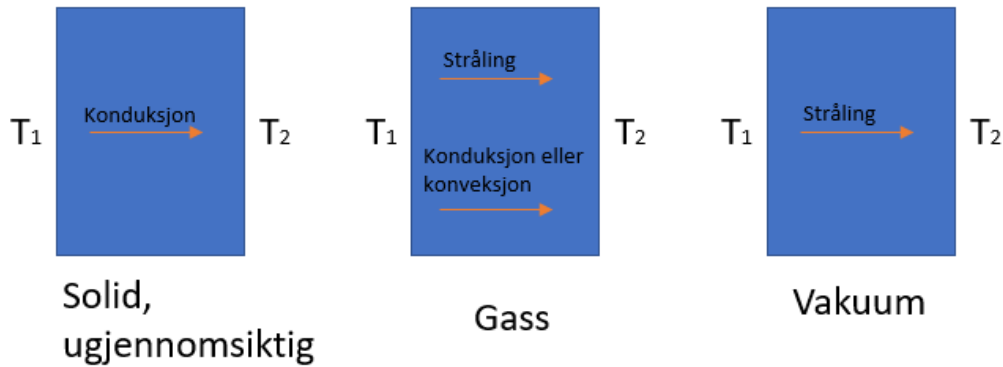
Klimasone [slagregnsbelastning]:	Slagregnspekjenning:
Liten	< 200mm slagregn per år
Moderat	200 – 400 mm slagregn per år
Stor	> 400 mm slagregn per år

Tabell 2.5-2: Nedbørsdata utvalgte steder (Kvande et al., 2013)

Sted:	Normalnedbør: [mm/år]	Slagregn: [mm/år]	Slagregnsretning: [θ]
Oslo (Blindern)	763	198	40
Ås	785	-	-
Sarpsborg	880	167	180

2.5.5 Varmetransport i materialer

Temperaturforskjeller skaper varmetransport. Summen av varmestrømmen går mot det kjøligste området. Varmetransport forekommer hovedsakelig i tre transportformer, konduksjon, konveksjon og stråling (Edvardsen & Ramstad, 2014). Figur 2.5-1 illustrer prinsippet bak varmetransport.



Figur 2.5-1: Varmetransport, $T_1 > T_2$. Modifisert fra (Çengel et al., 2015)

Konduksjon er energi som overføres fra atom til atom eller molekyler i et materiale. Energien overføres uten at atomene eller molekylene har noen form for forflytning (Lillestøl et al., 2001; Young & Freedman, 2015). Konduksjon går alltid fra høyere til lavere temperatur (Young & Freedman, 2015). Konduksjon eller varmeledning oppstår i faste stoffer, væsker og gasser (Edvardsen & Ramstad, 2014).

Konveksjon oppstår ved at gass eller væsker forflytter seg mellom to overflater med ulik temperatur (Edvardsen & Ramstad, 2014). Den termiske energien overføres ved direkte massetransport (Lillestøl et al., 2001). Hvis varmestrømmen oppstår på grunn av forskjeller i densitet er dette naturlig konveksjon (Young & Freedman, 2015).

Stråling er varmeoverføring via elektromagnetisk stråling som synlig lys, ultrafiolett stråling og infrarød stråling (Young & Freedman, 2015). Alle stoffer utstråler og absorberer elektromagnetisk stråling, noen stoffer transmitterer også stråling. Høye temperaturer gir lavere bølgelengder (Lillestøl et al., 2001; Young & Freedman, 2015). Varmestrålingen har bølgelengder fra $2 \mu\text{m}$ til $80 \mu\text{m}$ opp til temperaturer på 100°C (Edvardsen & Ramstad, 2014). Objekter som ikke er i termisk likevekt med omgivelsene vil utstråle (emittere) energi til omgivelsene til det blir i likevekt med systemet, objektet vil også absorbere stråling fra omgivelsene rundt (Lillestøl et al., 2001; Young & Freedman, 2015). Varmetransporten via stråling gir alltid en netto stråling fra varm til kald side (Edvardsen & Ramstad, 2014).

Varmekonduktivitet (λ) for materialer angir hvor godt et materiale leder varme. Varmekonduktivitet er avhengig av materialegenskaper som struktur, densitet, temperatur og fuktinnhold (Edvardsen & Ramstad, 2014). Materialer med høy varmekonduktivitet er en god varmeleder, lav varmekonduktivitet betyr at materialet er en god isolator for varme (Young & Freedman, 2015). Tabell 2.5-3 oppgir verdier for varmekonduktiviteten til noen vanlige byggematerialer.

Tabell 2.5-3: Varmekonduktivitet for et utvalg byggematerialer (Young & Freedman, 2015).

Materiale:	Varmekonduktivitet: W/mK
Rød tegl:	0,6
Betong	0,8
Rockwool	0,04
Treverk	0,12 – 0,04

For at en varmeendring skal oppstå i et system må varme eller arbeid tilføres. Varmekapasiteten til et system er mengden energi som skal til for å heve temperaturen til systemet med en grad. Formel 8 viser det matematiske uttrykket for varmekapasiteten (Lillestøl et al., 2001; Young & Freedman, 2015).

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (8)$$

Hvor ΔQ er energiendringen og ΔT er temperaturendringen.

Den spesifikke varmekapasiteten eller den termiske massen til et materiale er den varmeenergien 1 kg av et stoff opptar for å øke en grad (J/[kgK]) (Young & Freedman, 2015). Den spesifikke varmekapasiteten varierer for forskjellige materialer, tabell 2.5-4 angir spesifikk varmekapasitet for noen materialer

Tabell 2.5-4: Spesifikk varmekapasitet for et utvalg byggematerialer

Materiale:	Spesifikk varmekapasitet: [J/(kgK)]	Kilde:
Vann	4190	(Young & Freedman, 2015)
Tegl	830	(Hisdal & Kvande, 2011)
Trevirke	1600	(Ramstad, 2016)
Luft	1000	(Pettersson, 2013)

Termisk diffusivitet til et materiale oppgir hvor fort temperaturer endres i et materiale (Madsø, 2001). Lav termisk diffusivitet betyr at temperaturen i materialet endres sakte (Baehr & Stephan, 2011). Høy varmediffusivitet angir at materialet raskt kan frigir eller oppta en varmemengde hvis temperaturen i omgivelsene endres (Madsø, 2001). Formel 9 presenterer formelen for termisk diffusivitet og den termiske diffusiviteten til noen vanlige materialer er presentert i tabell 2.5-5 (Madsø, 2001).

$$a = \frac{k}{\rho * c_p} \quad (9)$$

Hvor k er varmekonduktiviteten, ρ er densitet og c_p er den spesifikke varmekapasiteten.

Tabell 2.5-5: Termisk diffusivitet for noen vanlige byggematerialer (Madsø, 2001).

Materiale:	Termisk diffusivitet: [m ² /s]
Vann	0,14*10 ⁻⁶
Gran	0,10*10 ⁻⁶
Tegl	0,52*10 ⁻⁶
Betong	0,76*10 ⁻⁶

Termisk effusivitet beskriver et materiales evne til å avgi termisk energi til omgivelsene. Følelsen av at et materiale er kjølig betyr at materialet har høy termisk effusivitet. Den termiske effusiviteten er i området $0,04 \text{ kW s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$ for isolatorer til $40 \text{ kW s}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$ for metaller (Blaine, 2018). Formel 27 beskriver termisk effusivitet matematisk.

Varmeovergangsmotstanden er en viktig faktor ved utregning av varmetransport i materialer.

Luftsjiktet rundt materialet eller fasaden vil ha en motstand mot varmetransport.

Varmeovergangsmotstanden påvirkes av strålingsegenskapene til materialet, lufthastigheten og temperaturen. Utendørs vil varmeovergangsmotstanden som regel være relativt lav på grunn av påvirkningsfaktorer som vind og stråling. Verdien for varmeovergangsmotstanden er bestemt etter NS-EN ISO 6946 og oppgir en standardverdi som tar hensyn til gjennomsnittlige konveksjons- og strålingsverdier (Edvardsen & Ramstad, 2014). Tabell 2.5-6 presenterer standardverdier (Edvardsen & Ramstad, 2014).

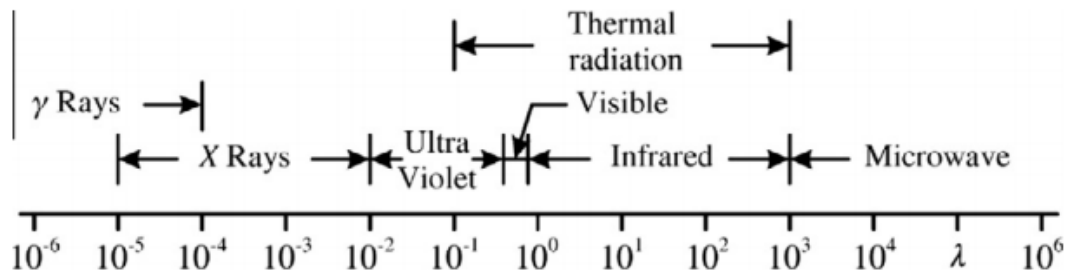
Tabell 2.5-6: Varmeovergangsmotstand i henhold til NS-EN ISO 6946

Overflate:	Varmeovergangsmotstand ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)		
	Oppover:	Horisontalt:	Vertikalt:
Innvendig R_{si}	0,10	0,13	0,17
Utvendig R_{se}	0,04	0,04	0,04

2.6 Termisk stråling

Et infrarødt kamera er basert på teorien bak termisk stråling. Termisk stråling er elektromagnetisk stråling. Termisk stråling kommer av bevegelser i molekyler i et materiale eller stoff. Intensiteten og frekvensen til termisk stråling øker med temperaturen i materialet eller stoffet (Pedersen, 2017).

Bølgelengden til infrarød stråling ligger i det elektromagnetiske strålingspekteret, med bølgelengder mellom 0,7µm og 1mm. Alle legemer med temperatur over -273°C (Det absolutte nullpunkt) sender ut infrarød stråling, som regel som langbølget infrarød stråling med bølgelengde på 8 µm til 15 µm, tilsvarende temperaturer mellom -80°C og 90°C. Infrarød stråling er usynlig for mennesker (Grøn, 2019a). Figur 2.6-1 viser hvordan stråling er inndelt etter bølgelengder (Kylili et al., 2014).



Figur 2.6-1: Elektromagnetiske spekteret

For å kunne beskrive den termiske utstrålingen fra et legeme må et svart legeme defineres. Et svart legeme absorberer all strålingen som det påvirkes av, fra alle vinkler. Intensiteten på strålingen er også uavhengig av retningen, dette kalles en diffus emitter (Baehr & Stephan, 2011). Et perfekt svart legeme eksisterer ikke, virkelige legemer vil reflektere stråling i spesifikke frekvensområder (Grøn, 2019b).

Den totale emissiviteten til et svart legeme som er en diffus emitter kan beregnes ved en spesifikk bølgelengde (λ), denne formelen er kjent som Plancks lov (Baehr & Stephan, 2011). Den totale mengden energi som et svart legeme opptar over hele spekteret kan beregnes ved å integrere Plancks lov fra null til uendelig, som vist i formel 10 (Kylili et al., 2014).

$$E_b(T) = \int_0^{\infty} I_{\lambda,b}(T, \lambda) d\lambda = \sigma T^4 \quad (10)$$

Formel 10 er kjent som Stefan-Boltzmanns lov, hvor σ er Stefan-Boltzmann konstant (5,6705*10⁻⁸ W/m²K⁴) og T er legemets absolute temperatur i Kelvin (Kylili et al., 2014). Stefan-Boltzmanns lov ble utviklet i 1884 av L. Boltzmann på grunnlag av arbeid gjort av J. Stefan i 1879 (Baehr & Stephan, 2011).

Den retningsbestemte spektrale emissiviteten til et legeme regnes i henhold til formel 11. Denne defineres som forholdet mellom utstrålingen fra en overflate med temperatur T, bølgelengde λ, i retningen θ og φ og strålingen til et svart legeme med temperatur T og bølgelengde λ. Emissiviteten vil i henhold til formel 11 alltid ligge i området 0 ≤ ε ≤ 1 (Kylili et al., 2014). Emissivitet er forholdet mellom stråling fra et legeme og strålingen fra en ideell overflate (Young & Freedman, 2015).

$$\varepsilon(\lambda, \theta, \phi, T) = \frac{I_{\lambda, \phi}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda, \phi}(\lambda, T)} \quad (11)$$

Formel 11 over vil gi forskjellige verdier ved forskjellige temperaturer, bølgelengder og retninger. I praksis forenkler man ved å si at emissiviteten er retningsuavhengig, ved å beregne gjennomsnittet for emissiviteten for alle retninger (Kylili et al., 2014). Tabell 2.6-1 inneholder verdier for emissivitet for noen utvalgte materialer.

Tabell 2.6-1: Emissivitet for forskjellige materialer (Baehr & Stephan, 2011).

Materiale:	Temperatur i Kelvin:	Emissivitet (ε):
Treverk, eik	293	0,90
Tegelstein, rød	293	0,93
Betong, røff overflate	293	0,94
Rullet aluminium	293	0,049

Når stråling treffer et legeme vil noe reflekteres, absorberes og transmitteres. De tre faktorene er representert ved refleksjon γ , absorpsjon α og transmisjon τ . Summen av disse skal være 1, se formel 12 (Baehr & Stephan, 2011).

$$\gamma + \alpha + \tau = 1 \quad (12)$$

Solide legemer transmitterer som regel ikke energi ($\tau = 0$). Transmisjon oppstår gjennomsiktige legemer. Dette gjør at formel 12 kan skrives om til formel 13 (Baehr & Stephan, 2011)

$$\gamma + \alpha = 1 \quad (13)$$

Kirchhoffs lov om stråling gir at emissiviteten og absorpsjonen for et materiale er like ved samme temperatur og bølgelengde. Ut ifra dette kan man utrykke dette ved formel 14 (Usamentiaga et al., 2014).

$$\alpha = \varepsilon \quad (14)$$

Fra formel 13 og formel 14 kan man benytte formel 15, utledet for solide legemer.

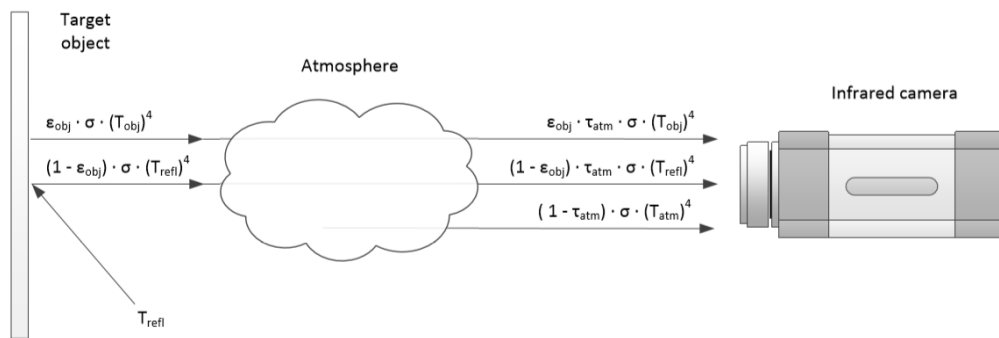
$$\varepsilon + \gamma = 1 \quad (15)$$

2.6.1 Temperaturmåling ved Infrarødt kamera

Måling av temperatur er en viktig faktor innen fysikken. Temperaturmålinger gir viktig informasjon om objekter (Usamentiaga et al., 2014). Et infrarødt kamera må sortere ut varme som påvirker miljøet rundt for å kunne gi nøyaktige målinger, denne prosessen heter compensation (Usamentiaga et al., 2014).

Den totale strålingen som kameraet registrerer (W_{tot}) kommer fra tre forskjellige kilder, utstrålingen fra legemet som skal måles (E_{obj}), utstrålingen fra miljøet rundt legemet (E_{refl}) og utstrålingen fra atmosfæren rundt (E_{atm}). Dette kan illustreres ved hjelp av formel 16, og prosessen er vist i figur 2.6-2 (Usamentiaga et al., 2014).

$$W_{tot} = E_{obj} + E_{refl} + E_{atm} \quad (16)$$



Figur 2.6-2: Stråling registrert av et infrarødt kamera (Usamentiaga et al., 2014).

Temperaturen til legemet kan hentes ut ved å sortere om på formel 16 ved hjelp av formelen for hvert enkelt komponent. Formel 17 til formel 19 viser uttrykket for hvert enkelt ledd (Usamentiaga et al., 2014).

$$E_{obj} = \varepsilon_{obj} * \tau_{atm} * \sigma * (T_{obj})^4 \quad (17)$$

$$E_{refl} = \rho_{obj} * \tau_{atm} * \sigma * (T_{refl})^4 = (1 - \varepsilon_{obj}) * \tau_{atm} * \sigma * (T_{refl})^4 \quad (18)$$

$$E_{atm} = \varepsilon_{atm} * \sigma * (T_{atm})^4 = (1 - \tau_{atm}) * \sigma * (T_{atm})^4 \quad (19)$$

Hvor ε_{obj} er objektets emissivitet, τ_{atm} er transmisjonen fra atmosfæren, T_{obj} er temperaturen til legemet, ρ_{obj} er refleksjonen fra legemet, T_{ref} er reflektert temperatur, ε_{atm} er emissiviteten til atmosfæren, og T_{atm} er temperaturen til atmosfæren (Usamentiaga et al., 2014).

Formel 16 til formel 19 omskrives til formel 20 for å kunne regne ut temperaturen til legemet.

$$T_{obj} = \sqrt[4]{\frac{W_{tot} - (1 - \varepsilon_{obj}) * \tau_{atm} * \sigma * (T_{refl})^4 - (1 - \tau_{atm}) * \sigma * (T_{atm})^4}{\varepsilon_{obj} * \tau_{atm} * \sigma}} \quad (20)$$

T_{obj} kan utregnes ved hjelp av fire parametere:

1. Legemets emissivitet.
2. Reflektert temperatur.
3. Transmisjonen fra atmosfæren.
4. Temperaturen i atmosfæren.

Transmisjonen fra atmosfæren estimeres ved hjelp av avstanden mellom legemet og kamera kombinert med den relative luftfuktigheten. Verdien for transmisjonen fra atmosfæren er som regel nære 1 ($\tau_{atm} \approx 1$). Temperaturen til atmosfæren hentes ut ved hjelp av et enkelt termometer (Usamentiaga et al., 2014). De to viktigste parameterne i formel 20 er legemets emissivitet og reflektert temperatur. Disse to faktorene er viktige deler for å kunne regne ut en nøyaktig verdi for overflatetemperaturen til legemer og objekter. Spesielt for legemer og objekter med lav emissivitet er dette viktig (Usamentiaga et al., 2014).

Infrarøde kameraer må kalibreres for å kunne måle så nøyaktig som mulig. Kalibreringen utføres ved hjelp av et svart legeme, ved å utnytte det svarte legemets evne til å kunne ha forskjellige og stabile temperaturer over tid. Kalibreringen er viktig for å kunne måle riktig utstrålt temperatur (Optris, -).

Den vanligste måten å måle nøyaktig temperatur er ved hjelp av en kalibrert standard. Denne metoden antar et materiale med emissivitet på 1 og en distanse på null. Materialet plasseres først under linsen til termograferingskameraet før en bruker temperaturen til materialet som referansetemperatur. Resultanten av de to temperaturene er den reflekterte temperaturen. Et vanlig benyttet materiale er en krøllet, flatt aluminiumsfolie (Usamentiaga et al., 2014).

2.7 Termisk fuktfaktor

Vanninnholdet måles ved hjelp av sammenligningen av temperaturøkningen etter en homogen oppvarming. Vanninnhold påvirker i stor grad den termiske kapasiteten til materialer (Ludwig et al., 2004). Vann i materialer øker den spesifikke varmekapasiteten til materialet, øker den termiske konduktiviteten og skaper en økning i densiteten (Ludwig et al., 2004). Varmekapasiteten, termisk konduktivitet og densitet kan uttrykkes ved formel 21 til formel 23, basert på Fouriers lov (Ludwig et al., 2004).

$$C_p = \frac{C_{pd} + WC_{pw}}{1 + W} \quad (21)$$

Hvor C_{pd} er varmekapasiteten til et tørt materiale, W er vanninnholdet i prosent og C_{pw} er varmekapasiteten til vann.

$$K = \frac{K_d + WK_w}{1 + W} \quad (22)$$

Hvor K_d er termisk konduktivitet til et tørt materiale, W er vanninnholdet i prosent og K_w er termisk konduktiviteten til vann.

$$\rho = \rho_d(1 + W) \quad (23)$$

Hvor ρ_d er densiteten til tørt materiale og W er fuktinnholdet i prosent.

Ved en homogen temperaturendring ved hjelp av konstant varmefluks, kan man uttrykke temperaturen til flaten på grunnlag av starttemperaturen og varmefluksen påført legeme. Formel 24 presenterer formelen for overflatetemperaturen (Ludwig et al., 2004).

$$T = T_0 + \frac{Q2\sqrt{t}}{\sqrt{\pi k\rho c_p}} \quad (24)$$

Hvor T_0 er starttemperatur, Q er varmefluks, t er tid.

Formel 24 skrives om til formel 25 som er avhengig av faktoren m , den termiske fuktfaktoren. Formel 26 viser termisk fuktfaktor og formel 27 viser formelen for e , termisk effusivitet.

$$T - T_0 = m\sqrt{t} \quad (25)$$

$$m = \frac{2Q}{e\sqrt{\pi}} \quad (26)$$

$$e = \sqrt{k\rho c_p} \quad (27)$$

Formel 21 til formel 27 gir det teoretiske grunnlaget for beregning av teoretisk og in-situ termisk fuktfaktor. Formel 28 presenterer ligningen benyttet i beregningen av in-situ termisk fuktfaktor, en omskriving av formel 25. Den termiske effusiviteten kan uttrykkes på grunnlag av 21 til formel 23 og formel 27, formelen er presentert i vedlegg 9.1

$$m = \frac{T - T_0}{\sqrt{t}} \quad (28)$$

For å kunne regnet ut den teoretiske termiske fuktfaktoren må påvirkningen av Q beregnes. Q beregnes etter formel 29 ved hjelp av formel 30 og formel 31 (Bienvenido-Huertas et al., 2019; Edvardsen & Ramstad, 2014). Varmeovergangsmotstanden er beskrevet i kapittel 2.5.4.

$$Q = U * \Delta T \quad (29)$$

Hvor U er varmegjennomgangskoeffisienten (U-verdien) til sjiktet og ΔT er temperaturdifferansen.

$$U = \frac{1}{R} \quad (30)$$

$$Q = \frac{1}{R} * \Delta T \quad (31)$$

3 Utstyr og programvare

Dette kapittelet presenterer utstyr og programvare brukt for å innhente og bearbeide data ved aktiv og passiv termografering utført i denne oppgaven.

3.1 Infrarødt kamera

Optris PI 640 er et kompakt infrarødt kamera med en oppløsning på 640x480 piksler, som kan levere både bilder og video (Optris, 2014). Nøyaktigheten til kameraet ligger på $\pm 2^{\circ}\text{C}$ eller $\pm 2\%$. Tekniske data for kameraet presenteres i tabell 3.1-1. Termografering utført med Optris PI 640 bearbeides og håndteres med programmet Optris PIX Connect (Optris, 2014).

Tabell 3.1-1: Teknisk data Optris PI 640 (Optris, 2014)

Komponent:	Data:
Optisk oppløsning	640x480 piksler
Temperatur område	-20°C til 900°C
Spekter	8-14 μm
Frekvens	32 Hz
Nøyaktighet	$\pm 2^{\circ}\text{C}$ eller $\pm 2\%$
Størrelse	45x56x90
Vekt	320 gram

3.2 Optris PIX connect

Optris PIX connect behandler data fra infrarøde kamera levert av Optris. Optris PIX connect gir muligheter for utvidet opptak med analyse i sanntid og monitorering av objekter i bevegelse (Optris). Optris PIX connect lar brukeren eksportere video, bilder, tekstfiler som kan behandles i Microsoft excel og filer med informasjon om farger som kan leses av programmer som Adobe photoshop (Optris) eller Fiji.

Programmet har innebygde funksjoner for utførelsen og kvaliteten til termograferingen, i tillegg til mulighetene for tilpasning av temperaturgrafer, referansebarer og målearealer i programmet (Optris). Figur 3.2-1 illustrerer programmet med bestemte arealer med tilhørende temperatur-tid graf.



Figur 3.2-1: Illustrasjon av brukergrensesnittet i Optris PIX connect

3.3 Fiji

Fiji (Fiji is just ImageJ) er et bilderedigeringsprogram først utgitt i 2011 (ImageJ, 2011). Fiji er et fritt tilgjengelig program basert på ImageJ med flere funksjoner (ImageJ, 2020).

Fiji passer fint for vitenskapelig analyse av bilder. Programmet kan vise, analysere, endre, prosessere, lagre og skrive ut bilder i 8,16 og 32-bit. ImageJ kan behandle mange filformater, blant annet TIF, GIF og JPEG (ImageJ, 2011). Programmet utfører en mengde operasjoner, blant annet pixelverdier, måle lengder og beregne vinkler (ImageJ, 2011).

ImageJ tillater utvidelser av programmet med Java-tillegg, dette gjør at programmet kan prosessere og analysere filer i et bredt spekter (ImageJ, 2011).

3.4 Håndholdte fuktmålere

Mastech MS6900 er en digital fuktmåler som måler fuktighet, relativ luftfuktighet mellom 10 og 90% med en nøyaktighet på $\pm 5\%$ og temperaturer mellom -10°C og 50°C med en nøyaktighet på $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Instrumentet måler i en dybde fra 0-50 millimeter med en målingshyppighet på 240 millisekund (Mastech, 2017). Mastech MS6900 er en ikke-destruktiv måler. Måleren måler motstanden i materialet (Mastech, 2017) og er en konduktiv måler. Tabell 3.4-1 presenterer grenseverdiene til Mastech MS6900.

Tabell 3.4-1: Grenseverdier Mastech MS6900 (Mastech, 2017)

Byggemateriale:	Absolutt fuktnivå:
Sement	0,7 – 9,2 %
Tegl	0,0 – 17,8 %
Gran	8,5 – 60 %

Fuktmåler CM er en berøringsfri fuktmåler. Fuktmålingene baseres på høyfrekvensprinsippet og er en ikke-destruktiv måler. Fuktmåleren gir en kjapp og enkel indikasjon på fuktnivået i forskjellige materialer. Fuktmåleren måler i en dybde på 20-40 millimeter i målområdet 0-100% (Biltema, 2017). Tabell 3.4-2 presenterer grenseverdier i fuktmåleren.

Tabell 3.4-2: Grenseverdier fuktmåler CM (Biltema, 2017).

Byggemateriale:	Verdi:	Fuktstatus:
Sement	<25	Tørr
	25-50	Risiko
	>50	Vått
Tre	<50	Tørr
	50-80	Risiko
	>80	Vått

3.5 Apogee pyranometer

Apogee pyranometer er et instrument som måler albedo stråling. Instrumentet måler kort og langbølget stråling med enheten W/m^2 . Instrumentet registrerer dato, GPS koordinater, helning fra horisonten, stråling ovenfra og under instrumentet. Målinger utført med Apogee pyranometer eksporteres til Excel via et minnekort som en *.txt fil (Use of the handheld apogee data logger 2019). Refleksjonsevnen til forskjellige flater måles i Albedo, en skala som angir prosentvis av innfallende lys som reflekteres, en albedo på 0,4 tilsvarer at 40% av innfallende lys reflekteres (Albedo, 2018).

Kortbølget stråling har bølgelengder mindre enn $3,5 \mu m$ ($\lambda < 3,5 \mu m$), langbølget stråling med bølgelengder større enn $3,5 \mu m$ ($\lambda > 3,5 \mu m$) (Zdunkowski et al., 2007). Synlig lys ligger i det langbølgede spekteret (UIO, 2019).

4 Metode

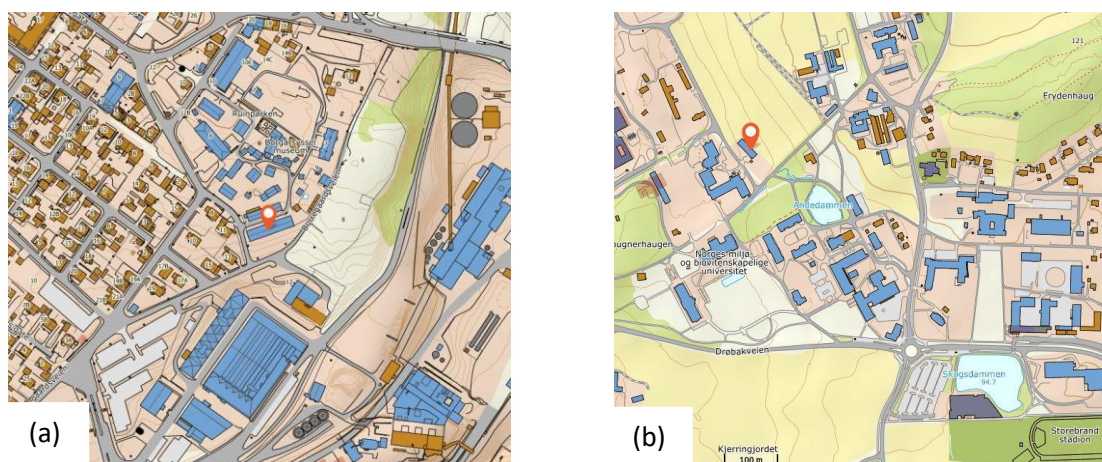
Metodekapittelet beskriver lokasjonene for feltforsøk, prosessen rundt datainnhenting og behandling av data etter utførte feltforsøk.

4.1 Lokasjoner for feltforsøk

Den aktive termograferingen av historisk teglsten er utført ved arbeiderboligen ved St. Olavs vold ved Borgarsyssel museum i Sarpsborg. Arbeiderboligen i Sarpsborg er oppført i 1840-årene og er i dag en fredet bygning. Bygningen er i dag ikke i bruk, og forfallet på bygningen er stort.

Den passive termograferingen utføres ved KA-bygget (Kjemisk analyselaboratorium) ved NMBU i Ås. Bygningen er stengt og det er tydelige tegn til forfall på fasaden som vender sør-øst.

Figur 4.1-1 presenterer plasseringen til lokasjonene for feltforsøk, Tabell 4.1-1 oppgir de tilhørende koordinatene.



Figur 4.1-1: (a) - Plassering til St. Olavs vold ved Borgarsyssel museum, (b) - Plassering til KA-bygget i ved NMBU

Tabell 4.1-1: Koordinater lokasjoner for feltforsøk

Sted:	Nord:	Øst:
St. Olavs Vold	59.278052	11.1237623
KA-bygget	59.6679114	10.7669362

4.2 Datainnhenting

Første del av datainnhenting beskriver hvordan fuktmålinger ble innhentet for fasadene. Kapittel 4.2.2 presenterer hvordan den aktive termograferingen ble utført for å kartlegge fuktnivået i fasadene. Kapittel 4.2.3 presenterer hvordan passiv termografering ble utført på en fasade på KA-bygget ved NMBU i Ås.

Innhenting av data er utført mellom 18 mars og 19 mars. Forsøkene ble utført på dager med oppholdsvær og plussgrader utendørs.

4.2.1 Fuktmålinger

Fuktnivået i den historiske teglsteinfasaden estimeres ved hjelp av håndholdte fuktmålere. Målerne benyttet er presentert i kapittel 3.4. Fuktmålerne stilles inn på riktig materialtype og kalibreres i henhold til instruksjoner fra produsent før fuktnivået måles på utvalgte punkter. For å øke nøyaktigheten til målerne tas det ut tre målinger per punkt som benyttes for å estimere en gjennomsnittsverdi for målingene på hvert punkt. Verdiene dokumenteres for å kunne benyttes som referanseverdier ved kartlegging av fuktnivå ved aktiv termografering.

4.2.2 Aktiv Termografering

Prosedyren for feltforsøk er utviklet fra metodene presentert av (Ludwig et al., 2004; Maierhofer & Roellig, 2009) i samarbeid med masterstudent Martine Antonsen (Antonsen, 2020). Prosedyren for aktiv termografering avhenger av utstyret presentert i tabell 4.2-1. Figur 4.2-1 og figur 4.2-2 viser utstyret satt opp for å kunne utføre aktiv termografering.

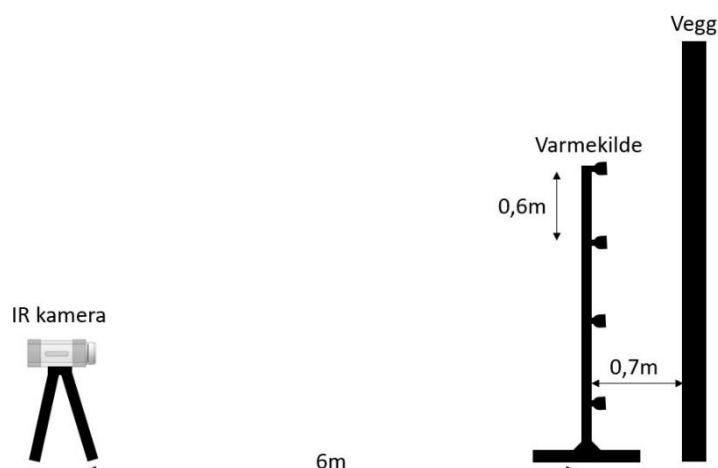
Tabell 4.2-1: Utstyr for feltforsøk

Komponent:		
1.	IR kamera	Optris PI 640
2.	PC	med Optris PIX Connect
3.	Varmekilde	Stativ med 4 terrassevarmere
4.	Pyranometer	Apogee solmåler

IR kameraet logger fasaden under utførelsen av aktiv termografering. Varmekilden benyttet under aktiv termografering påfører varme med den hensikt å skape temperaturforskjell over fasaden under in-situ testing av fasader. Hver varmekilde har et operativt varmestrålingsområde på 0,6x1m. Det totale oppvarmingsområdet for hele stativet er 2,4m².



Figur 4.2-1: Oppsett for aktiv termografering



Figur 4.2-2: Skisse av oppsett for aktiv termografering.

Bildetakingsfrekvensen til Optris PI 640 til 1 Hz, for å redusere mengden data som må behandles. Emissiviteten til områdene som skal termograferes velges også, for å få en så nøyaktig termografering som mulig. Emissiviteten er oppgitt i tabell 4.2-3 og tabell 2.6-1.

Oppsettet for feltforsøket er presentert i tabell 4.2-2. Tabellen oppgir avstander mellom komponenter i forsøket og tidsbruk på de enkelte fasene av termograferingen.

Oppsettet til forsøkene er tilpasset etter testing av strålingsarealer og optimalisering av avstander for å kunne best mulig utnytte varmekilde og kameraet. Tilpasningen ble utført for å ha jevn fordeling av strålevarmen og justering slik at hele det oppvarmede området ble dekket av en termografering. Optimaliseringen er utført i laboratorium og utendørs på vegg ved TF fløy 5 ved NMBU i samarbeid med masterstudent Martine Antonsen (Antonsen, 2020).

Tabell 4.2-2: Avstander og utførelsestid under feltforsøk

Data:	Verdi:	Enhet:
Avstand kamera – vegg	6	[m]
Avstand vegg – stativ	0,7	[m]
Avstand mellom lamper – vertikalt	0,6	[m]
Oppvarmingsareal	2,4	[m ²]
Oppvarming	2	[min]
Nedkjøling	10	[min]
Total logging	12	[min]

Tabell 4.2-3 presenterer data for feltforsøkene, herunder meteorologiske data, lufttemperatur, dato, tidspunkter og materialdata.

Tabell 4.2-3: Data - feltforsøk

Data – Feltforsøk:		
Sted:	Sarpsborg	
Himmelretning:	Øst / Nord / Vest	
Materiale:	Teglstein	
Emissivitet:	0,93	
Dato:	18.03.2020	
Klokkeslett	11:30 – 14:00	
Lufttemperatur:	5,8 °C – 10,1 °C	Sol, oppholdsvær
RF intervall:	29% - 38%	

Dokumentasjonen av solstråling under aktiv termografering er utført med Apogee pyranometer. Målingen utføres vinkelrett med vegg for å måle innstråling og reflektert stråling.

4.2.3 Passiv termografering

Fuktnivået i KA-bygget undersøkes ved hjelp av passiv termografering. Tilgangen til fasaden på bygget er begrenset, målinger utføres på avstand av bygget. Termograferingen utføres kun på fasaden som vender sør-øst. Tabell 4.2-4 presenterer nødvendig utstyr for termografering og målinger.

Tabell 4.2-4: Utstyr passiv termografering

Komponent:	
IR kamera	Optris PI 640
PC	med Optris PIX Connect
Pyranometer	Apogee solmåler

Tabell 4.2-5 viser stedsdata for passiv termografering.

Tabell 4.2-5: Teststed passiv termografering

Sted:	Fasaderetning:	Første termografering:	Siste termografering:	Dato:	Emissivitet:
KA-bygget	Sør-øst	05:25*	12:00	19.03.2020	0,93
		*Før soloppgang			

Dokumentasjonen av solstråling under passiv termografering er utført med Apogee pyranometer. Instrumentet måler albedo stråling, som måles parallelt med veggen. I tillegg er værdata hentet ut fra værstasjonen på Ås (Yr.no, 2020).

4.3 Behandling av data

Data innhentet ved hjelp av metodene beskrevet i kapittel 4.2 bearbeides. Kapittel 4.3.1 beskriver bearbeidelsen av data innhentet gjennom aktiv termografering, kapittel 4.3.2 omhandler fuktmålingene og fuktkart beskrives i kapittel 4.3.3.

4.3.1 Termografering

Termograferingen utføres med Optris PI 640 og behandles i Optris PIX Connect for å hente ut temperaturer for videre arbeid.

Områdene for punktmåling av temperaturer defineres med tilhørende emissivitet for materialet. Ved aktiv termografering hentes verdier for temperaturer ut etter to min oppvarming og tre minutter nedkjøling. Temperaturene i de spesifiserte områdene eksporteres som en temperatur mot tid diagram i *.dat tekstfil som eksporteres til Microsoft Excel og text image data (*.csv.) fil for utarbeidelse av fuktkart.

Ved passiv termografering hentes verdier for temperaturer ut ved start termografering og slutt termografering som spesifisert i kapittel 4.2-3 som text image data (*.csv.) fil.

4.3.2 Beregning av termisk fuktfaktor

Verdier eksportert fra Optris PIX Connect bearbeides i Microsoft Excel. Beregning av termisk fuktfaktor for valgte arealer under forsøk utført in-situ utføres etter formel 28. Utrekningen av er en kvalitativ metode, hvor man ser på temperaturforskjeller for gitte punkter. Termisk fuktfaktor beregnes ved start nedkjøling og etter 3 minutter nedkjøling ved aktiv termografering.

Ved passiv termografering utregnes in-situ termisk fuktfaktor ved start og slutt termografering etter formel 28.

4.3.3 Fuktkart

Fuktkart for områder kartlagt in-situ utføres i Fiji. Utarbeidelsen av fuktkart gjør det mulig å estimere områder med fukt under termograferingen. Under utarbeidelsen av fuktkart benyttes bilder hentet ut som spesifisert i kapittel 4.3.2. For å estimere fuktnivået i fasaden benyttes formler fra kapittel 2.7 og etter regresjonslinjen for den teoretiske termiske fuktfaktoren oppgitt i vedlegg 9.2.

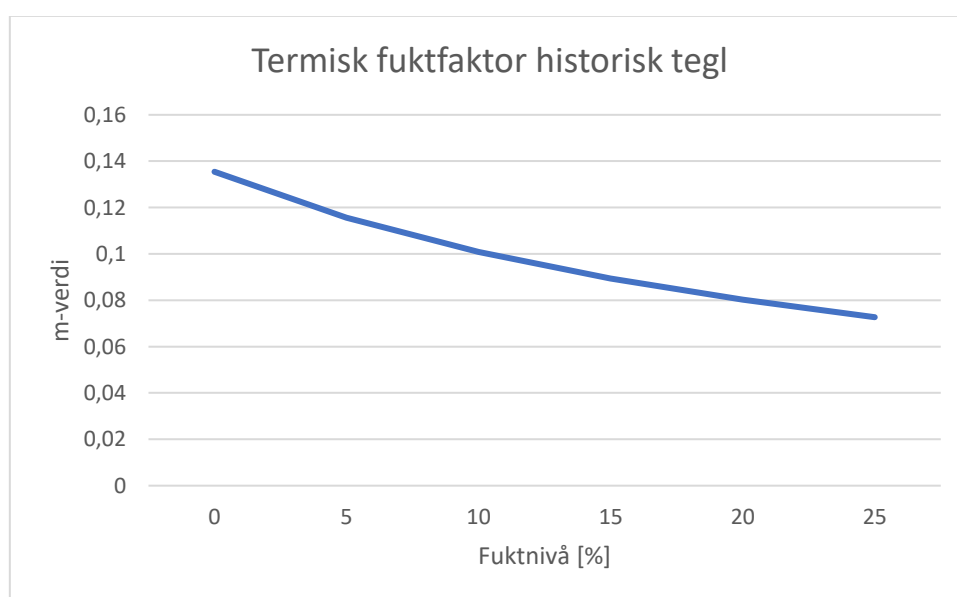
Gyldighetsområdet til fuktkartet omfatter det totale arealet til varmekilden hvor forstyrrelser av andre komponenter i fasaden må utelukkes.

4.3.4 Teoretisk termisk fuktfaktor

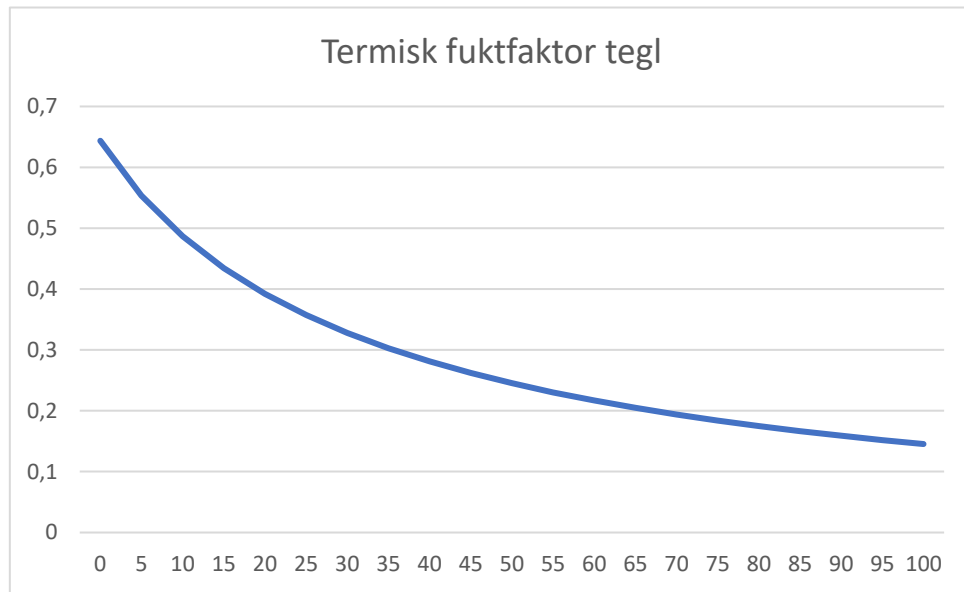
Kartleggingen av fukt i fasaden utføres ved sammenligning opp mot teoretiske kurver for termisk fuktfaktor (m), utarbeidet etter formel 21 til 27. Figur 4.3-1 og figur 4.3-2 presenterer teoretiske termiske fuktfaktor-verdier med tilhørende absolutt fuktnivå basert på materialegenskaper for historisk massivtegl og tegl oppgitt i tabell 4.3-1. Utrekning av teoretisk termisk fuktfaktor er i vedlegg 9.2

Tabell 4.3-1: Materialelegenskaper benyttet i utregning av teoretisk termisk fuktfaktor.

Materiale:	Materialegenskap:		Verdi:	Enhet:	Kilde:
Historisk Tegl:					
	Varmekonduktivitet	K	0,6	W/mK	(Fraunhofer-IBP - Holzkirchen)
	Spesifikk varmekapasitet	C_p	850	Ws/KgK	(Fraunhofer-IBP - Holzkirchen)
	Densitet	ρ	1800	Kg/m ³	(Fraunhofer-IBP - Holzkirchen)
Tegl:					
	Varmekonduktivitet	K	0,9	W/mK	(Madsø, 2001)
	Spesifikk varmekapasitet	C_p	850	Ws/KgK	(Madsø, 2001)
	Densitet	ρ	1750	Kg/m ³	(Madsø, 2001)
Vann:					
	Varmekonduktivitet	K	0,59	W/mK	(Ormestad & Bedersen, 2019)
	Spesifikk varmekapasitet	C_p	4180	Ws/KgK	(Pedersen, 2019)
Solstråling					
	Solpåvirkning Aktiv termografering	Q	40	W/m ²	In-situ måling
	Estimert solpåvirkning passiv termografering	Q	660	W/m ²	(Cableizer, 2020)



Figur 4.3-1: Teoretisk termisk fuktfaktor-kurve for historisk tegl



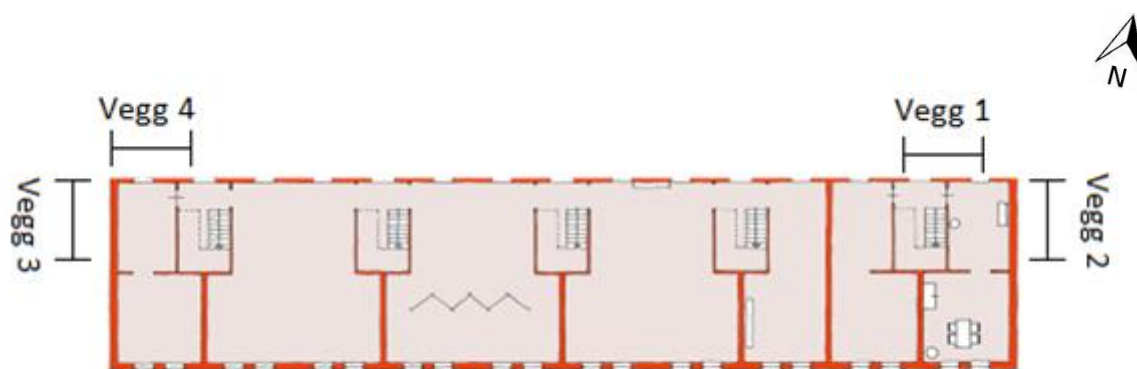
Figur 4.3-2: Teoretisk termisk fuktfaktor-kurve for tegl

5 Resultat

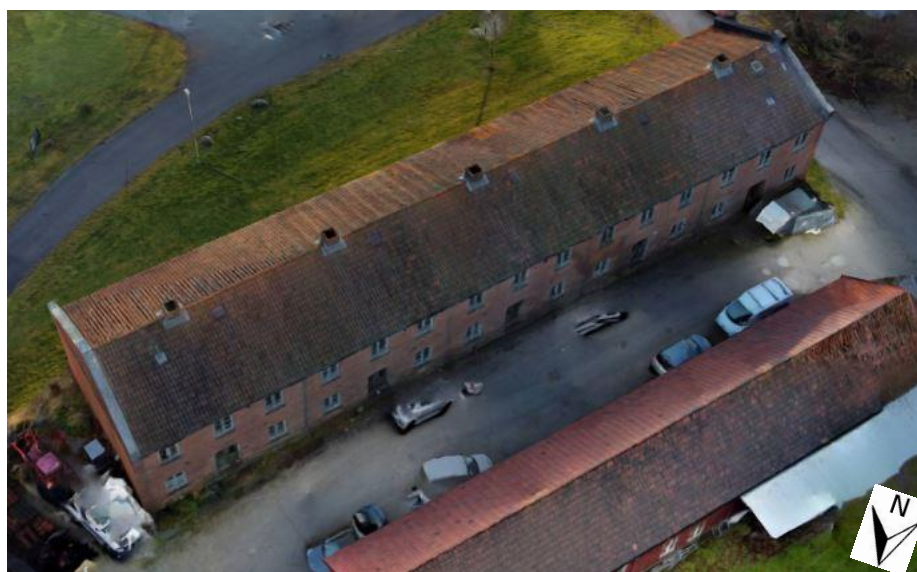
Delkapitlene i denne delen tar for seg testforsøkene av historisk teglstensfasade og passiv termografering av teglstensvegg. Kapitlene er inndelt etter testvegger med utførte målinger og resultater fra beregninger utført på hver testvegg.

5.1 Aktiv termografering av historisk teglstensfasade

Denne delen presenterer aktiv termografering utført på den historiske teglstensfasaden. Lokasjonen til de forskjellige målingene er oppgitt i figur 5.1-1. Figur 5.1.2 presenterer St. Olavs Vold sett ovenfra ved hjelp av en dronescanning utført av Borgarsyssel museum i januar 2020.



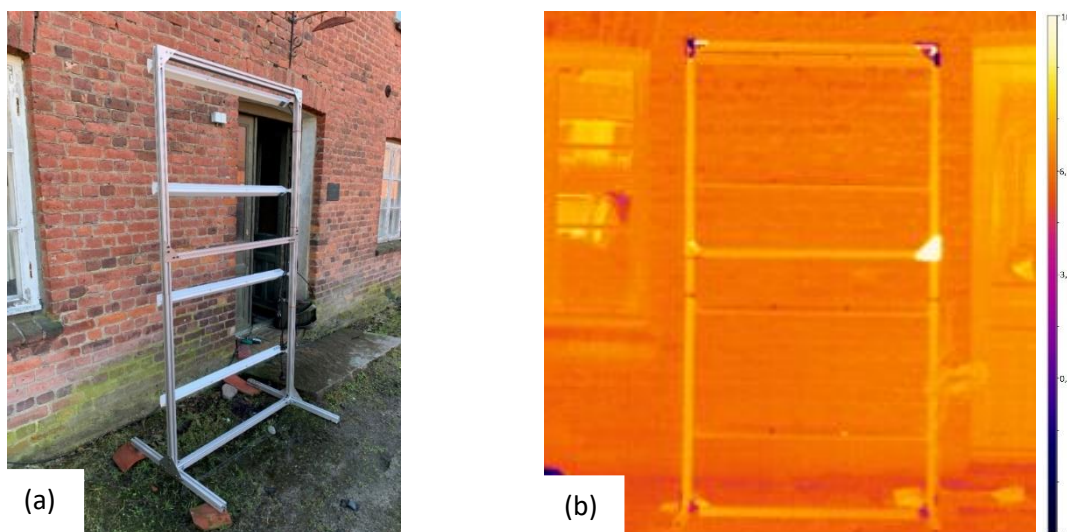
Figur 5.1-1: Lokasjoner for aktiv termografering utført ved St Olavs Vold. Modifisert figur utgitt av (museum)



Figur 5.1-2: Dronescanning av St. Olavs Vold, Borgarsyssel museum (museum).

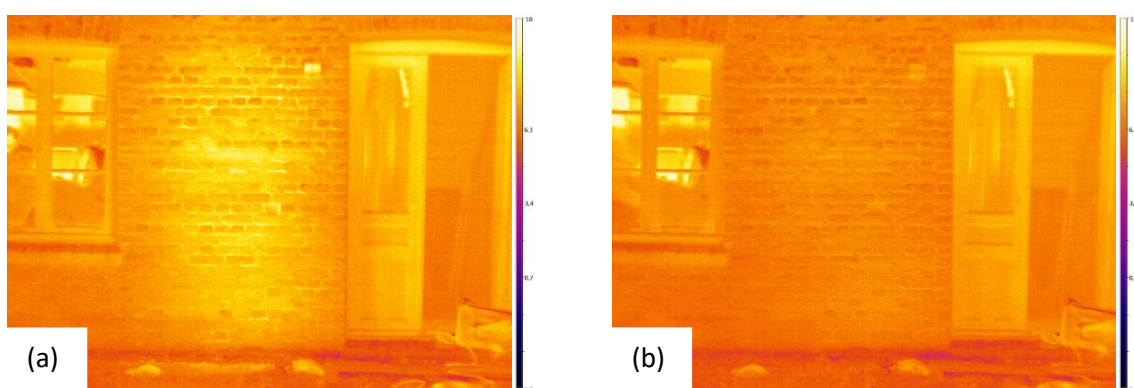
5.1.1 Vegg 1 – Nord

Vegg 1 er presentert i figur 5.1-3, (a) presenterer oppsatt varmerigg, (b) presenterer termografering før aktiv termografering. Plasseringen til vegg 1 er etter figur 5.1-1. Starttemperaturen på aktuelt snitt på vegg 1 før aktiv termografering varierer mellom 5,2°C og 6,0°C, hvor de laveste temperaturene ligger lengst ned på vegg 1. Gjennomsnittet over vegg 1 er på 6,0°C.



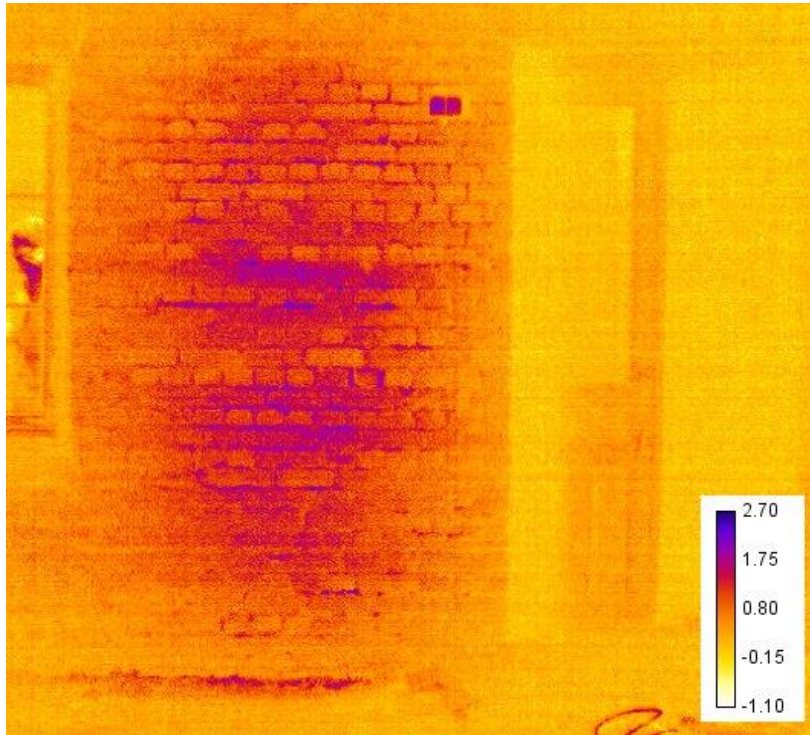
Figur 5.1-3: (a) - Visuelt bilde vegg 1, (b) - Temperatur før oppvarming

Temperaturen over vegg 1 ved start nedkjøling av er presentert i figur 5.1-4 (a). Temperaturen på oppvarmet område varierer mellom 5,2°C og 9,3°C. De laveste temperaturene er lokalisert i ytterkantene av oppvarmingsområdet. Figur 5.1-4 (a) viser en tydelig temperaturstigning over fasaden sammenlignet med starttemperaturer. Temperaturene over fasaden ved slutt nedkjøling er presentert i figur 5.1-4 (b). Temperaturene er hentet ut etter 3 minutter nedkjøling. Termograferingen viser at temperaturene over fasaden varierer fra 5,4°C til 7,4°C.



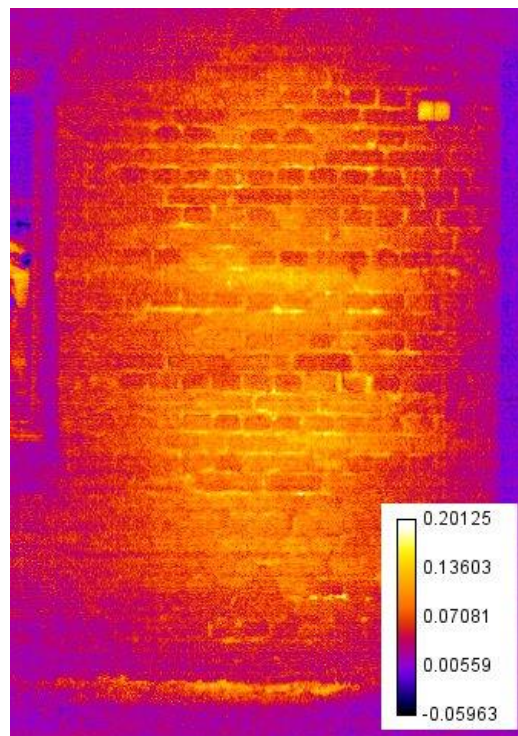
Figur 5.1-4: (a) - Start nedkjøling av vegg 1 aktiv termografering, (b) - Slutt nedkjøling av vegg 1 aktiv termografering

Temperaturvariasjonen som oppstår ved aktiv termografering på vegg 1, er presentert i figur 5.1-5. Figuren viser at det er en temperaturvariasjon over fasaden fra 0,8°C til 2,7°C



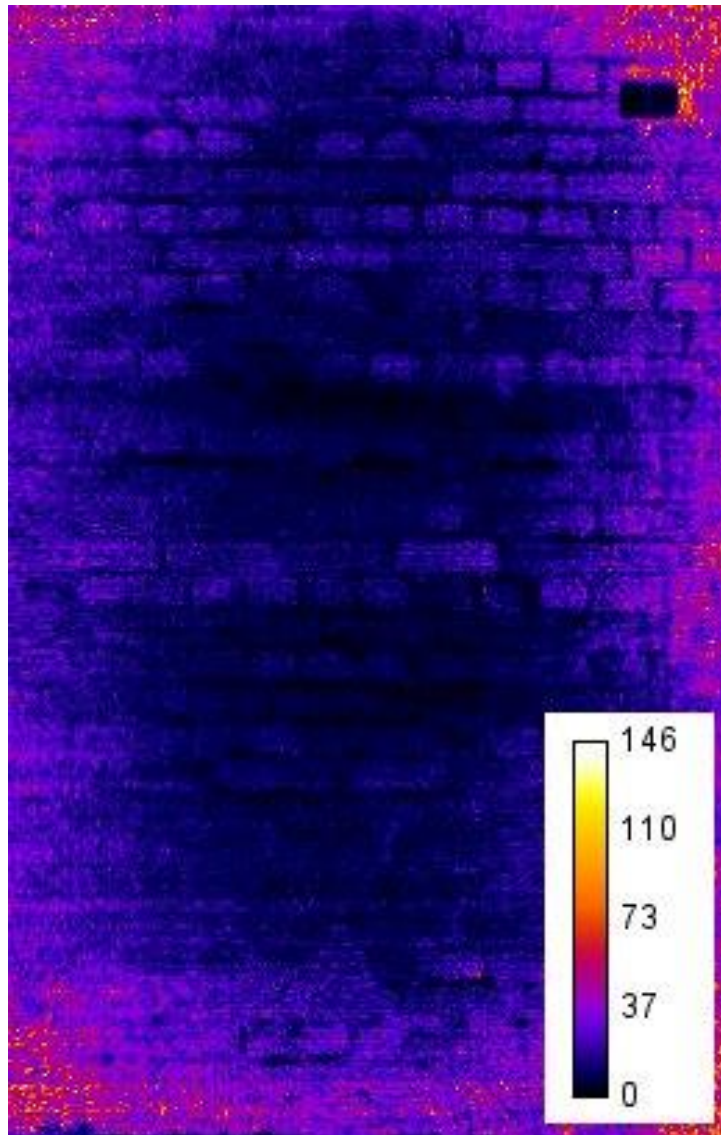
Figur 5.1-5: Temperaturendringen ved aktiv termografering vegg 1

Termisk fuktfaktor-kart for vegg 1 er presentert i figur 5.1-6. Verdiene for termisk fuktfaktor varierer fra 0,07 til 0,15 innenfor gyldighetsområdet til kartet.



Figur 5.1-6: Fuktkart vegg 1 ved aktiv termografering

Fuktkartet for vegg er presentert i figur 5.1-7. Fuktkartet indikerer at det er et fuktnivå på mellom 0% og 35% for vegg. Mørke områder indikerer tørrere områder enn lysere områder.



Figur 5.1-7: Fuktkart for vegg 1 - Nord

Punktundersøkelsene utført under aktiv termografering er presentert i figur 5.1-8. Punktene er valgt ut ifra visuell undersøkelse under forsøk, med tilhørende verdier for fuktnivåer målt ved hjelp av håndholdte fuktmålere presentert i tabell 5.1-1.

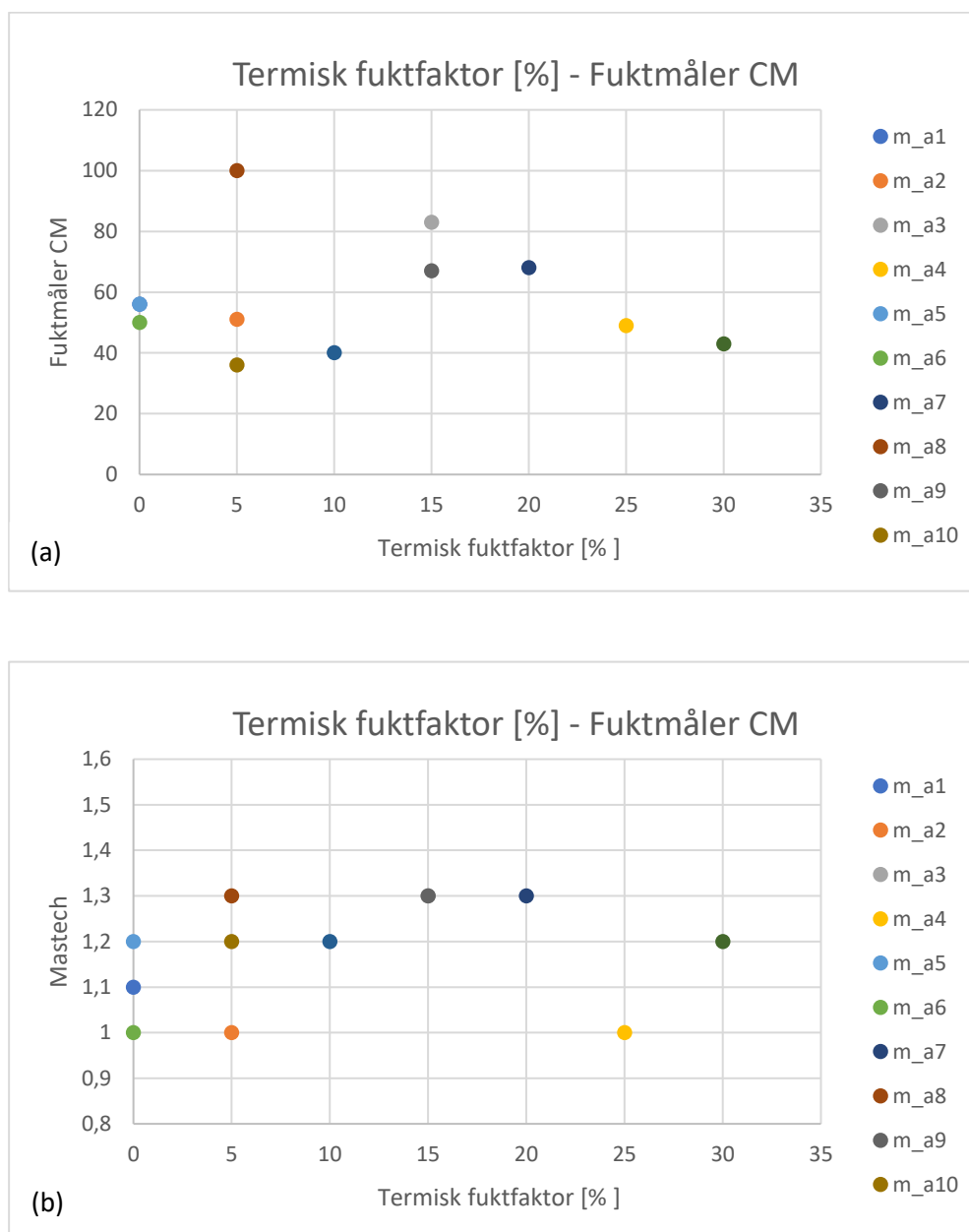
Verdiene for den termiske fuktfaktoren for punktene presentert i tabell 5.1-1. Verdiene varierer fra 0,06 til 0,26 og antyder at punktmålingene har et fuktnivå mellom 0% og 30% i henhold til referanseverdier fra kapittel 4.3.4. Figur 5.1-9 (a) presenterer håndholdte målinger gjort med fuktmåler CM opp mot fuktnivået hentet ut ved den termiske fuktfaktoren. Figur 5.1-9 (b) presenterer fuktnivået målt med mastech fuktmåler opp mot den termiske fuktfaktoren.



Figur 5.1-8: Punktmålinger utført på vegg 1

Tabell 5.1-1: Verdier punktmålinger utført vegg 1

Punkt:	Termisk fuktfaktor:	Fuktnivå [%]:	Mastech:	Fuktmåler CM:
m_a1 (1)	0,2385	0	1,1	56
m_a2 (2)	0,1118	5	1	51
m_a3 (3)	0,0820	15	1,3	83
m_a4 (4)	0,0745	25	1	49
m_a5 (5)	0,2609	0	1,2	56
m_a6 (6)	0,2087	0	1	50
m_a7 (7)	0,0894	20	1,3	68
m_a8 (8)	0,1267	5	1,3	100
m_a9 (9)	0,0969	15	1,3	67
m_a10 (10)	0,1267	5	1,2	36
m_a11 (11)	0,1043	10	1,2	40
m_a12 (12)	0,0670	30	1,2	43



Figur 5.1-9: Håndholdte fuktmålere mot termisk fuktfaktor – vegg 1

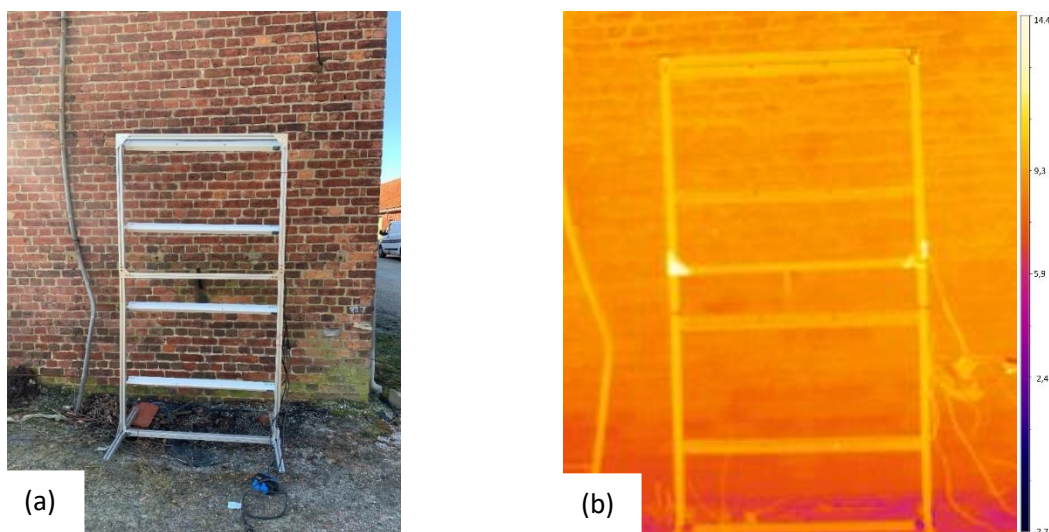
Solmålingene utført under feltforsøket er oppgitt i tabell 5.1-2. Målingene viser at det er en lav påvirkning av kortbølget stråling og en normal påvirkning fra langbølget stråling. Snittet av kortbølget og langbølget innstråling er 60,34 W/m² og 345,13 W/m². Totalt absorbert stråling for teglstenen under feltforsøket er 47,24 W/m² for kortbølget stråling og -15,00 W/m² (netto reflektert) langbølget stråling.

Tabell 5.1-2: Solmåling utført ved aktiv termografering vegg 1

Målinger: [W/m ²]	Kortbølget stråling:	Reflektert kortbølget:	Langbølget stråling:	Reflektert langbølget:	Absorbert kortbølget:	Absorbert langbølget:
Måling 1:	60,69	13,69	346,57	358,84	47,00	-12,27
Måling 2:	59,72	12,89	343,93	360,63	46,83	-16,70
Måling 3:	60,60	12,73	344,88	360,91	47,87	-16,03
Gjennomsnitt:	60,34	13,10	345,13	360,13	47,24	-15,00

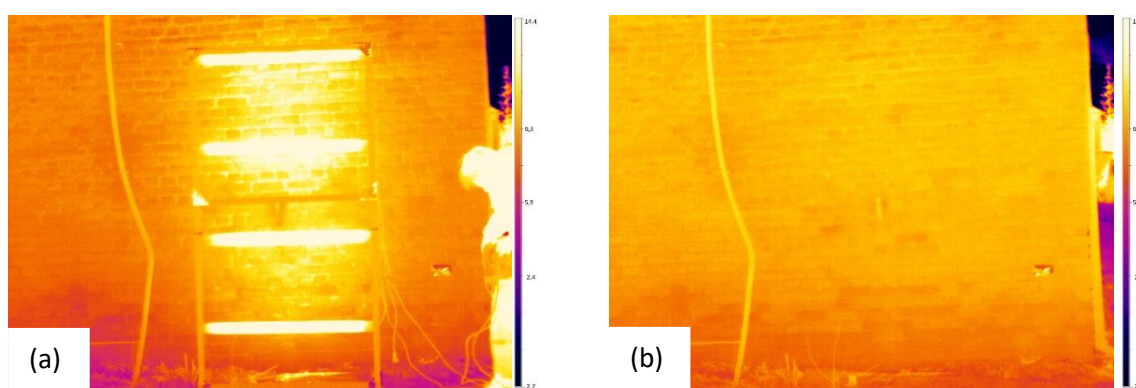
5.1.2 Vegg 2 – Øst

Vegg 2 er presentert figur 5.1-10, (a) presenterer oppsatt varmerigg, (b) presenterer termografering før aktiv termografering. Plasseringen til vegg 2 er etter figur 5.1-1. Starttemperaturen på aktuelt snitt på vegg 2 før aktiv termografering varierer mellom 7,0°C og 9,2°C, hvor de laveste temperaturene ligger lengst ned på vegg 2. Gjennomsnittet over vegg 2 er på 8,6°C.



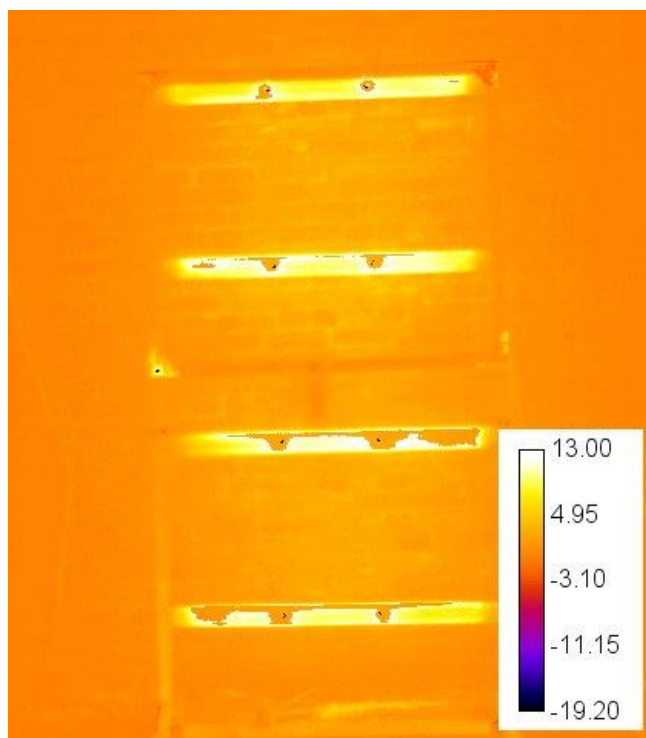
Figur 5.1-10: (a) - Visuelt bilde vegg 2, (b) - Temperatur før oppvarming

Temperaturen over vegg 2 ved start nedkjøling av er presentert i figur 5.1-11 (a). Temperaturen på oppvarmet område varierer mellom 7,7°C og 13,4°C. De laveste temperaturene er lokalisert i ytterkantene av oppvarmingsområdet. Figur 5.1-11 (a) viser en tydelig temperaturstigning over fasaden sammenlignet med starttemperaturer. Temperaturene over fasaden ved slutt nedkjøling er presentert i figur 5.1-11 (b). Temperaturene er hentet ut etter 3 minutter nedkjøling. Termograferingen viser at temperaturene over fasaden varierer fra 7,4°C til 11,0°C.



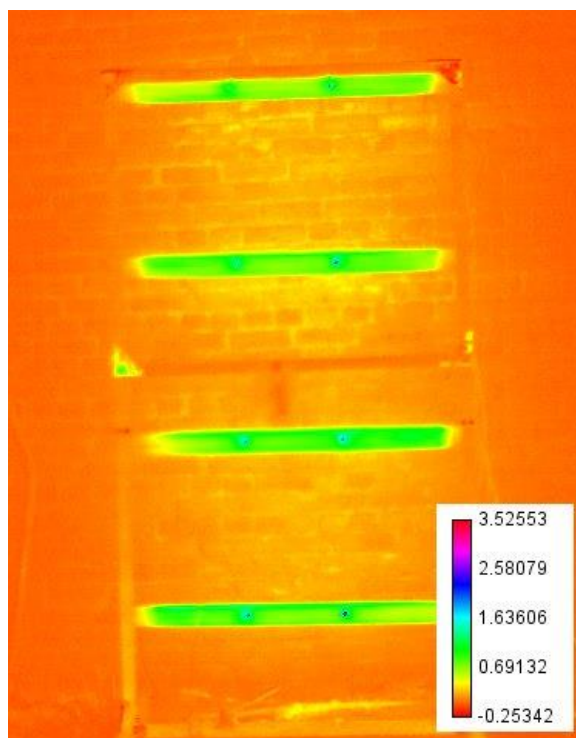
Figur 5.1-11: (a) - Start nedkjøling av vegg 2 aktiv termografering, (b) - Slutt nedkjøling av vegg 2 aktiv termografering

Temperaturvariasjonen som oppstår ved aktiv termografering på vegg 2, er presentert i figur 5.1-12. Figuren viser at det er en temperaturvariasjon over fasaden fra 1,0°C til 3,5°C



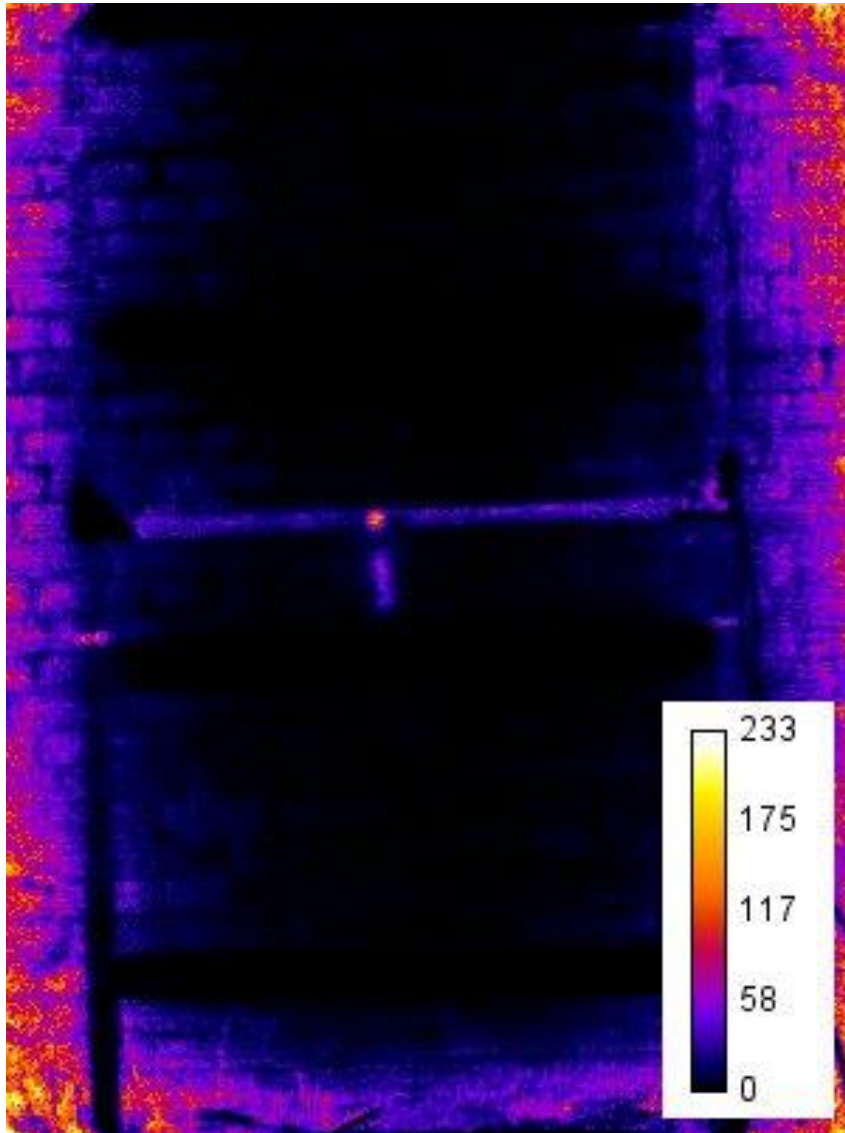
Figur 5.1-12: Temperaturendringen ved aktiv termografering vegg 2

Termisk fuktfaktor-kart for vegg 2 er presentert i figur 5.1-13. Verdiene for termisk fuktfaktor varierer fra 0,05 til 0,25. innenfor gyldighetsområdet til kartet.



Figur 5.1-13: Termisk fuktfaktor-kart vegg 2 ved aktiv termografering

Fuktkartet for vegg er presentert i figur 5.1-7. Mørke områder indikerer tørre områder. Fuktkartet viser at fuktnivået i fasaden i gyldighetsområdet til fuktkartet er 0%



Figur 5.1-14: Fuktkart vegg 2 - Øst

Punktundersøkelsene utført under aktiv termografering er presentert i figur 5.1-15. Punktene er valgt ut ifra visuell undersøkelse under forsøk, med tilhørende verdier for fuktnivåer målt ved hjelp av håndholdte fuktmålere presentert i tabell 5.1-3.

Verdiene for den termiske fuktfaktoren for punktene er presentert i tabell 5.1-3, verdiene varierer fra 0,08 til 0,23. Dette antyder at punktmålingene har et fuktnivå på mellom 0% og 20% i henhold til referanseverdier fra kapittel 4.3.4. Figur 5.1-16 (a) presenterer håndholdte målinger gjort med fuktmåler CM opp mot fuktnivået hentet ut ved den termiske fuktfaktoren. Figur 5.1-16 (b) presenterer fuktnivået målt med mastech fuktmåler opp mot den termiske fuktfaktoren.

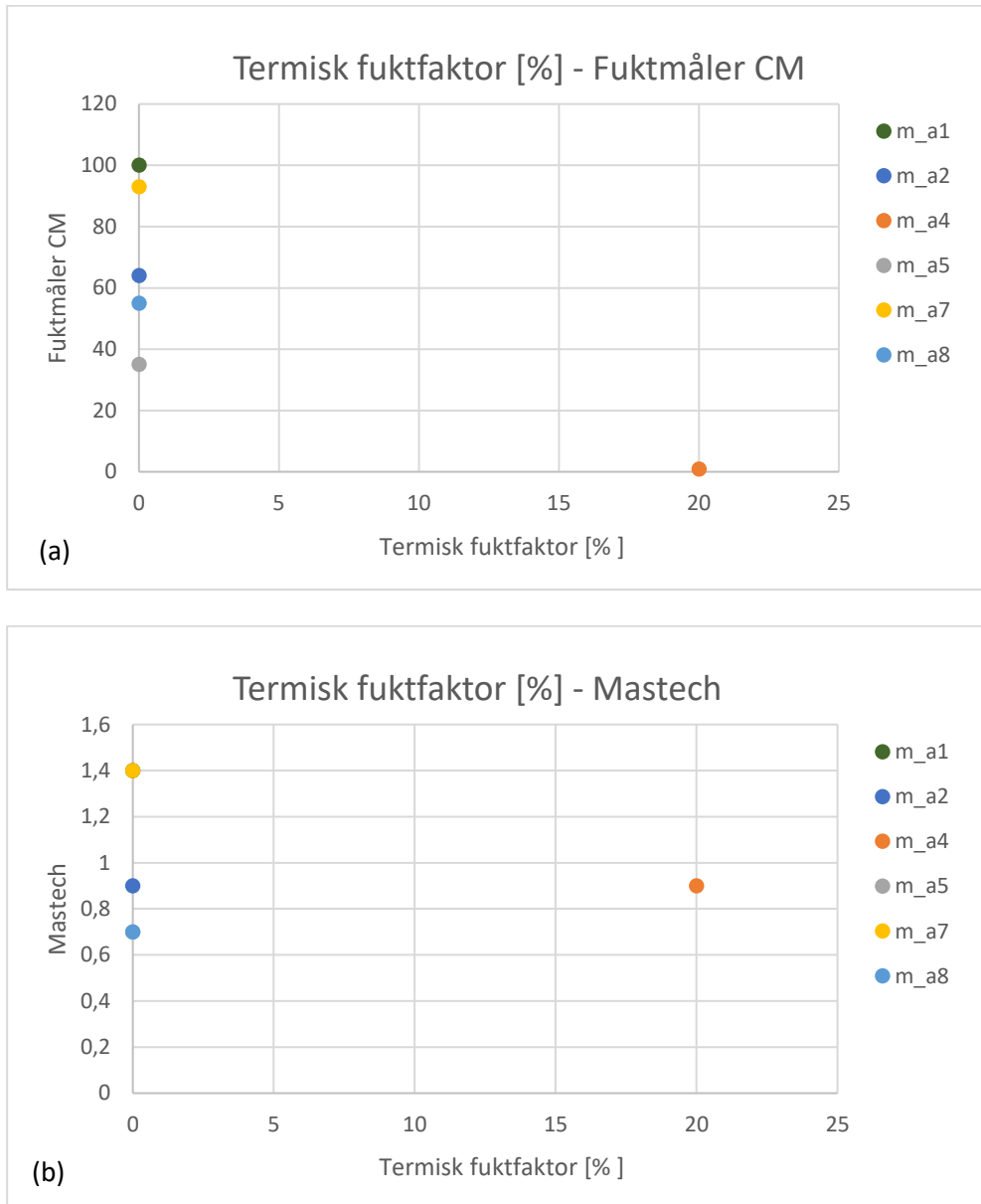


Figur 5.1-15: Plassering av punktmålinger utført på vegg 2

Tabell 5.1-3: Punktmålinger utført vegg 2

Punkt:	Termisk fuktfaktor:	Fuktnivå [%]:	Mastech:	Fuktmåler CM:
m_a1 (1)	0,1416	0	1,4	100
m_a2 (2)	0,1863	0	0,9	64
m_a3 (3) *	0,0074	-	1,4	100
m_a4 (4)	0,0894	20	0,9	54
m_a5 (5)	0,2161	0	0,7	35
m_a6 (6) *	0	-	0,8	40
m_a7 (7)	0,2086	0	1,4	93
m_a8 (8)	0,2311	0	0,7	55
m_a9 (9) *	-0,0074	-	0,7	46

* Punkter utenfor området til aktiv termografering.



Figur 5.1-16: Håndholdte fuktmålere mot termisk fuktfaktor - vegg 2

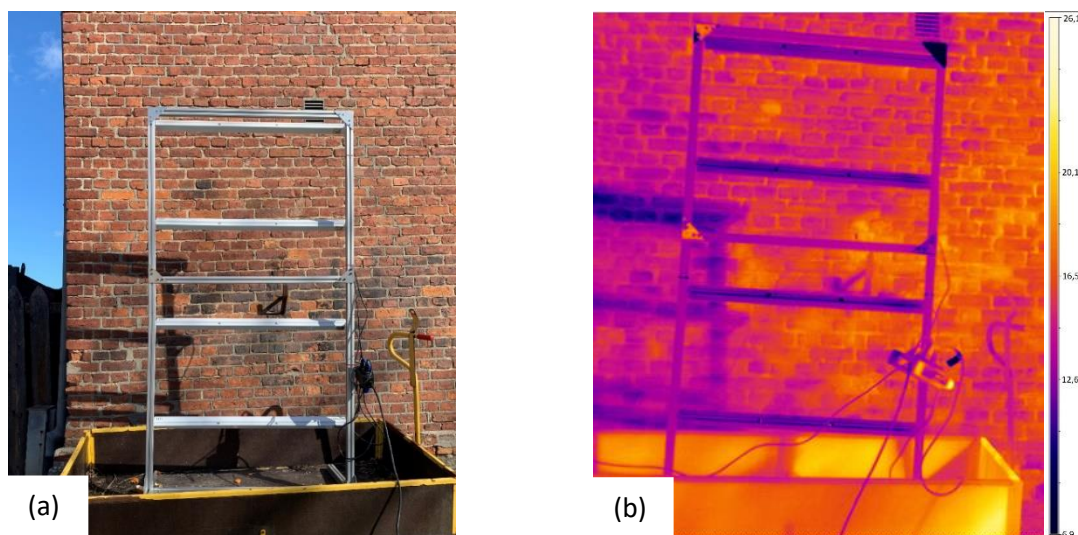
Solmålingene utført under feltforsøket er oppgitt i tabell 5.1-4. Målingene viser at det er en lav påvirkning av kortbølget stråling og en normal påvirkning fra langbølget stråling. Snittet av kortbølget og langbølget innstråling er 31,06 W/m² og 330,34 W/m². Totalt absorbert stråling for teglstenen under feltforsøket er 24,08 W/m² for kortbølget stråling og -21.65 W/m² (netto reflektert) langbølget stråling.

Tabell 5.1-4: Solmåling utført ved aktiv termografering vegg 2

Målinger: [W/m ²]	Kortbølget stråling:	Reflektert kortbølget:	Langbølget stråling:	Reflektert langbølget:	Absorbert kortbølget:	Absorbert langbølget:
Måling 1:	35,10	6,45	330,82	353,88	26,65	-23,06
Måling 2:	22,88	7,71	330,95	348,23	15,17	-17,28
Måling 3:	35,19	6,77	329,26	353,86	28,42	-24,6
Gjennomsnitt:	31,06	6,98	330,34	351,99	24,08	-21,65

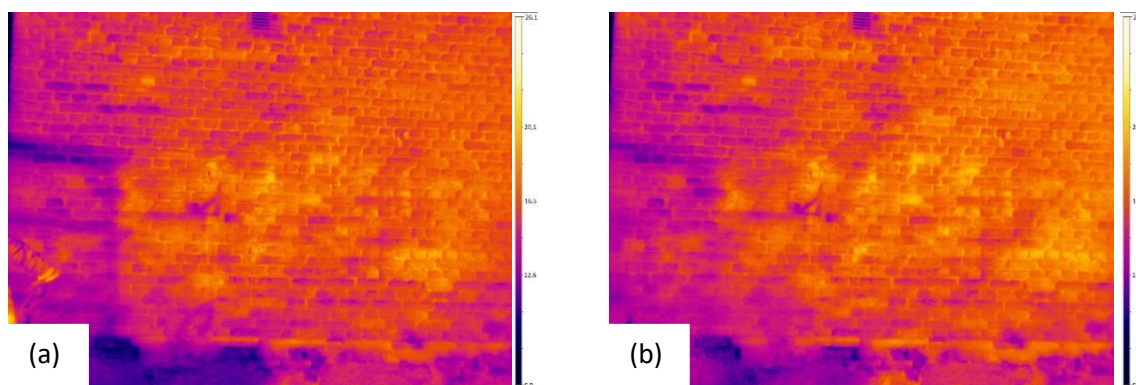
5.1.3 Vegg 3 – Vest

Vegg 3 er presentert i figur 5.1-17, (a) presenterer oppsatt varmerigg, (b) presenterer termografering før aktiv termografering. Plasseringen til vegg 3 er etter figur 5.1-1. Starttemperaturen på aktuelt snitt på vegg 3 før aktiv termografering varierer mellom 15,7°C og 18,6°C. Gjennomsnittet over vegg 3 er på 15,8°C.



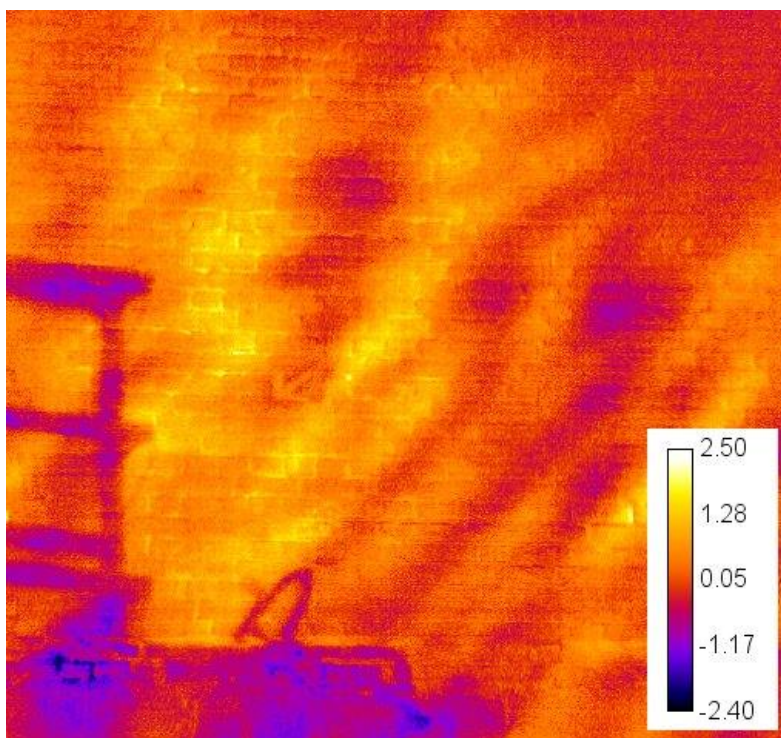
Figur 5.1-17: (a) - Visuelt bilde vegg 3, (b) - Temperatur før oppvarming

Temperaturen over vegg 3 ved start nedkjøling av er presentert i figur 5.1-18 (a). Temperaturen på oppvarmet område varierer mellom 13,7°C og 20,3°C. Temperaturforskjellene over fasaden er jevnt fordelt utover hele området. Temperaturene over fasaden ved slutt nedkjøling er presentert i figur 5.1-18 (b). Temperaturene er hentet ut etter 3 minutter nedkjøling. Termograferingen viser at temperaturene over fasaden varierer fra 13,3°C til 19,7°C. Temperaturvariasjonen over fasaden er minimal etter avkjøling.



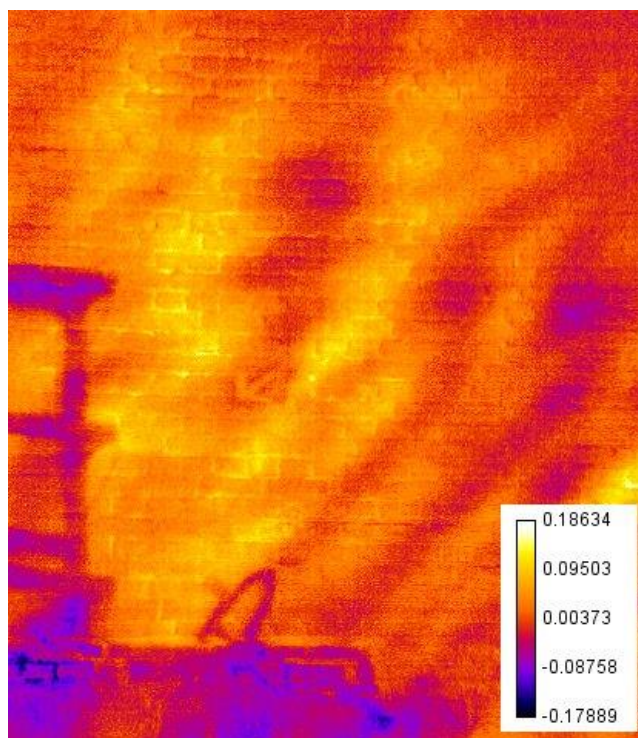
Figur 5.1-18: (a) - Start nedkjøling av vegg 3 aktiv termografering, (b) - Slutt nedkjøling av vegg 3 aktiv termografering

Figur 5.1-19 viser at det er en temperaturforskjell over fasaden sammenlignet med temperaturer før aktiv termografering. Termograferingen viser at det er forstyrrelser fra stativet med varmekilden.



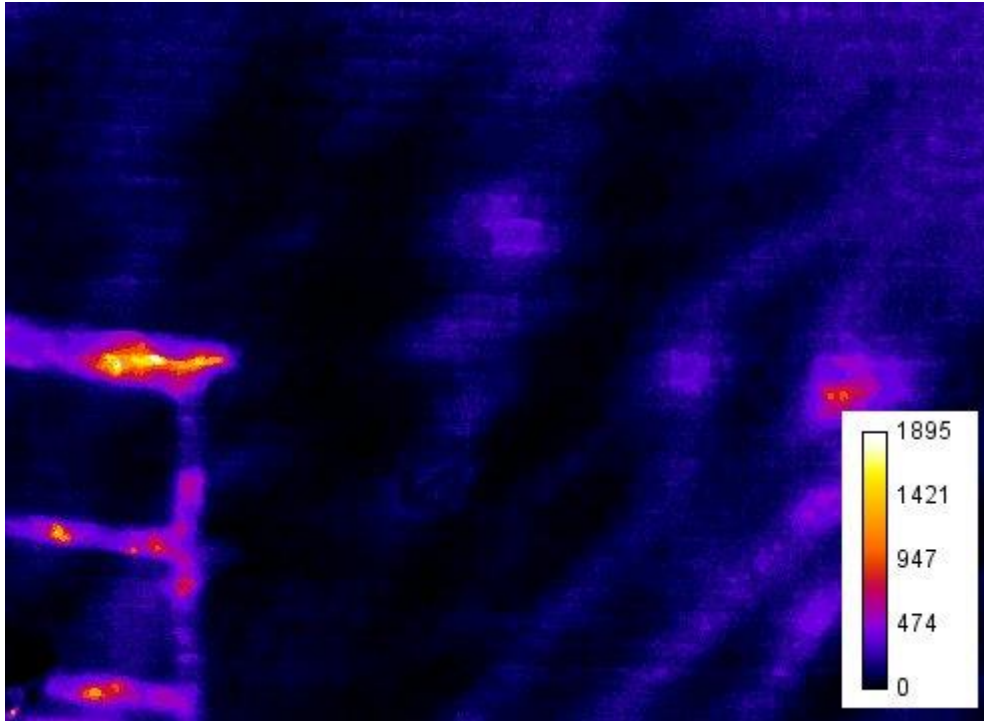
Figur 5.1-19: Temperaturendringen ved aktiv termografering vegg 3

Termisk fuktfaktor-kart for vegg 3 er presentert i figur 5.1-20. Verdiene for den termiske fuktfaktoren varierer fra 0,003 til 0,09 innenfor gyldighetsområdet til kartet.



Figur 5.1-20: Termisk fuktfaktor vegg 3 ved aktiv termografering.

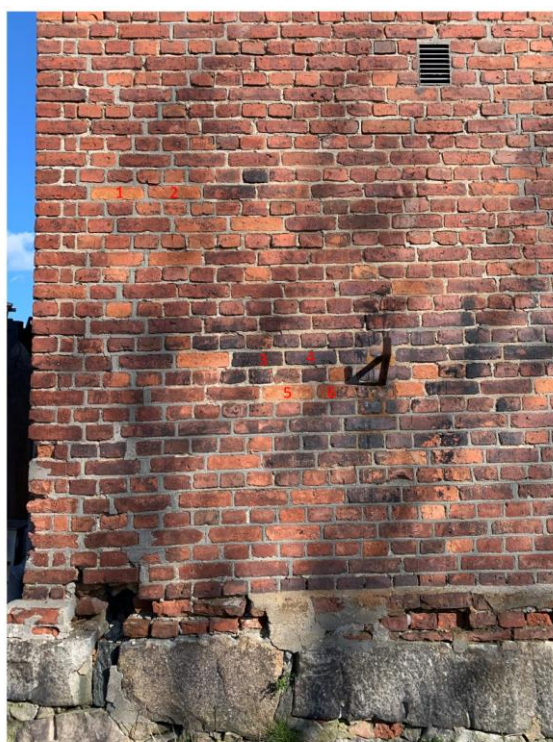
Fuktkart for veggen er presentert i figur 5.1-21. Fuktkartet indikerer at det er et fuktnivå på mellom 15% og 100% for veggen. Mørke områder indikerer tørrere områder enn lysere områder. Fuktkartet viser at påvirkningen av solstrålingen skaper forstyrrelser i fuktkartet.



Figur 5.1-21: Fuktkart for vegg 3 – Vest

Punktundersøkelsene utført under aktiv termografering er presentert i figur 5.1-22. Punktene er valgt ut ifra visuell undersøkelse under forsøk, med tilhørende verdier for fuktnivåer målt ved hjelp av håndholdte fuktmålere presentert i tabell 5.1-5.

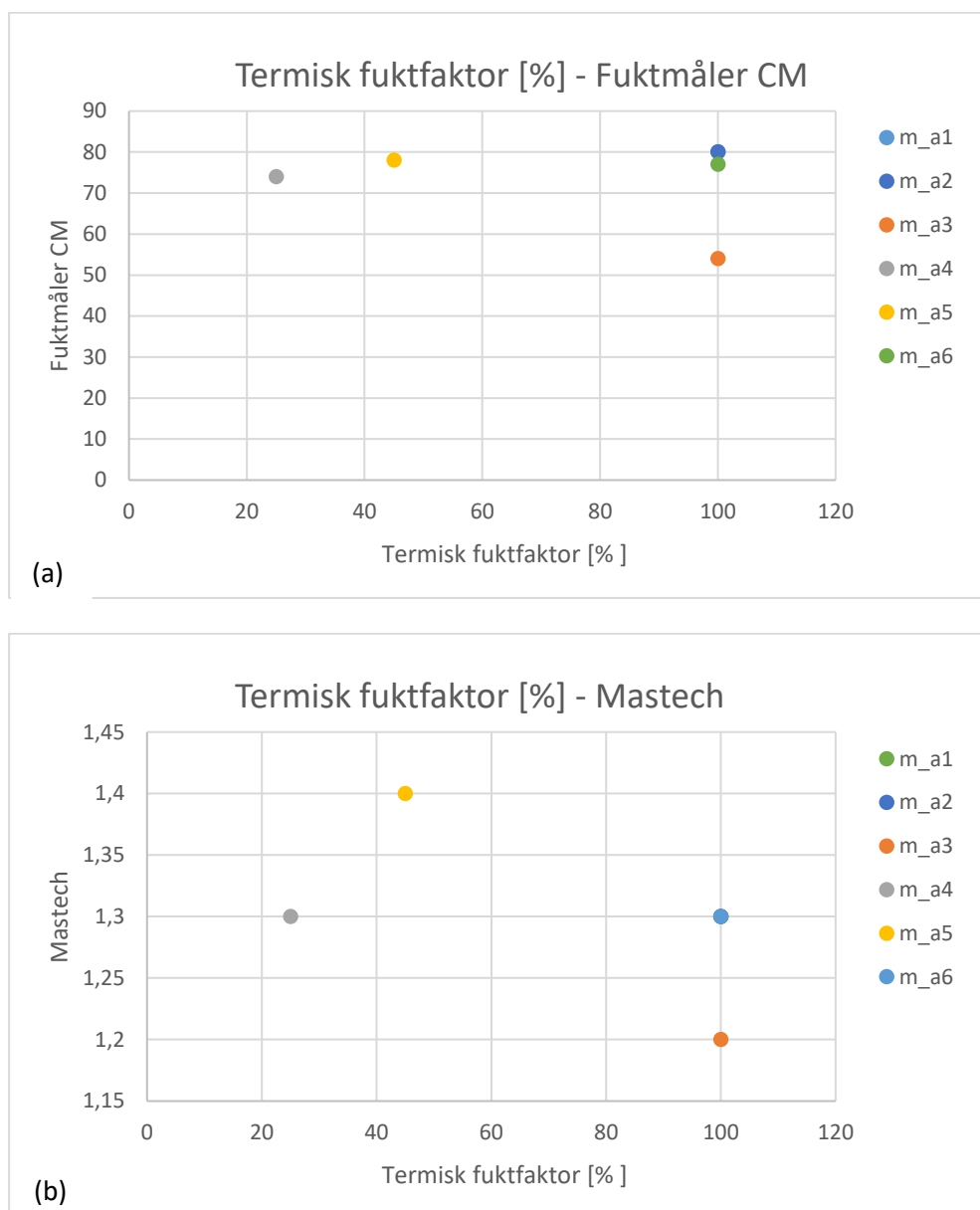
Verdiene for den termiske fuktfaktoren for punktene er presentert i tabell 5.1-5, verdiene varierer fra 0,014 til 0,07 og antyder at punktmålingene har et fuktnivå på mellom 25% og 100% i henhold til referanseverdier fra kapittel 4.3.4. Figur 5.1-23 (a) presenterer håndholdte målinger gjort med fuktmåler CM opp mot fuktnivået hentet ut ved den termiske fuktfaktoren. Figur 5.1-23 (b) presenterer fuktnivået målt med mastech fuktmåler opp mot den termiske fuktfaktoren.



Figur 5.1-22: Plassering av punktmålinger utført på vegg 3

Tabell 5.1-5: Punktmålinger utført vegg 3

Punkt:	Termisk fuktfaktor:	Fuktnivå [%]:	Mastech:	Fuktmåler CM:
m_a1 (1)	0,0223	100	1,3	80
m_a2 (2)	0,0224	100	1,3	80
m_a3 (3)	0,0224	100	1,2	54
m_a4 (4)	0,0745	25	1,3	74
m_a5 (5)	0,0522	45	1,4	78
m_a6 (6)	0,0149	100	1,3	77



Figur 5.1-23: Håndholdte fuktmålere mot termisk fuktfaktor vegg 3

Solmålingene utført under feltforsøket er oppgitt i tabell 5.1-6. Målingene viser at det er en stor påvirkning av kortbølget stråling og en normal påvirkning fra langbølget stråling. Snittet av kortbølget og langbølget innstråling er 331,58 W/m² og 398,85 W/m². Totalt absorbert stråling for teglstenen under feltforsøket er 245,76 W/m² for kortbølget stråling og -64,31 W/m² (netto reflektert) langbølget stråling.

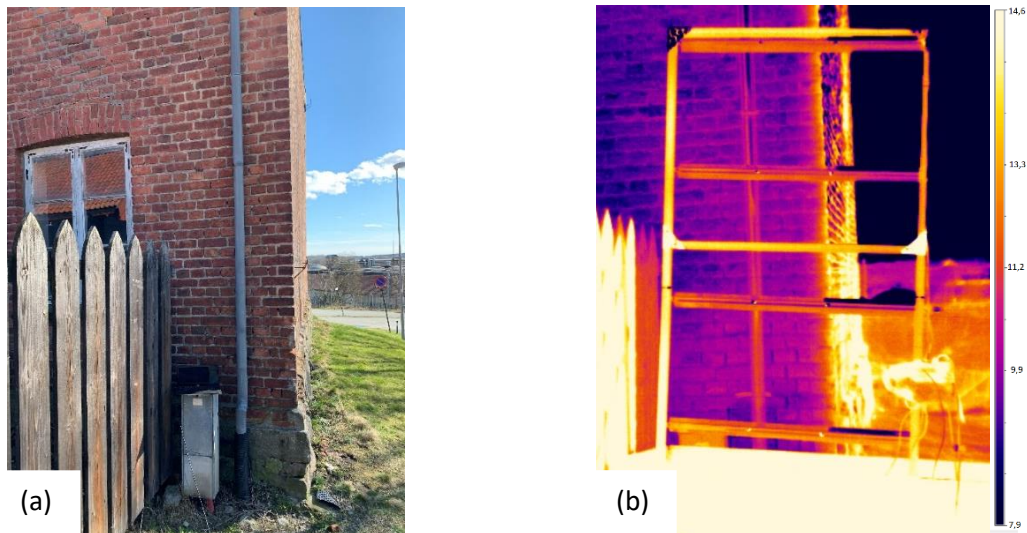
Tabell 5.1-6: Solmåling utført ved aktiv termografering vegg 3

Målinger: [W/m ²]	Kortbølget stråling:	Reflektert kortbølget:	Langbølget stråling:	Reflektert langbølget	Absorbert kortbølget:	Absorbert langbølget:
Måling 1:	302,35	88,23	334,45	398,15	214,12	-63,70
Måling 2:	332,59	84,46	336,26	398,99	248,13	-62,73
Måling 3:	359,79	84,75	332,92	399,41	275,04	-66,49
Gjennomsnitt:	331,58	85,81	334,54	398,85	245,76	-64,31

5.1.4 Vegg 4 - Nord

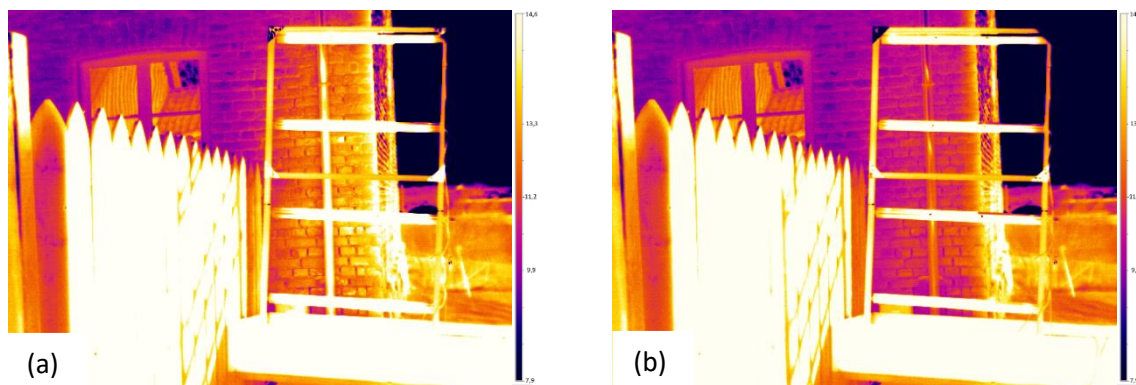
Vegg 4 er presentert i figur 5.1-24, (a) presenterer vegg hvor feltforsøk er utført, (b) presenterer termografering før aktiv termografering. Plasseringen til vegg er etter figur 5.1-1.

Starttemperaturen på aktuelt snitt på vegg før aktiv termografering varierer mellom 9,0°C og 10,2°C. Gjennomsnittet over vegg er på 9,6°C.



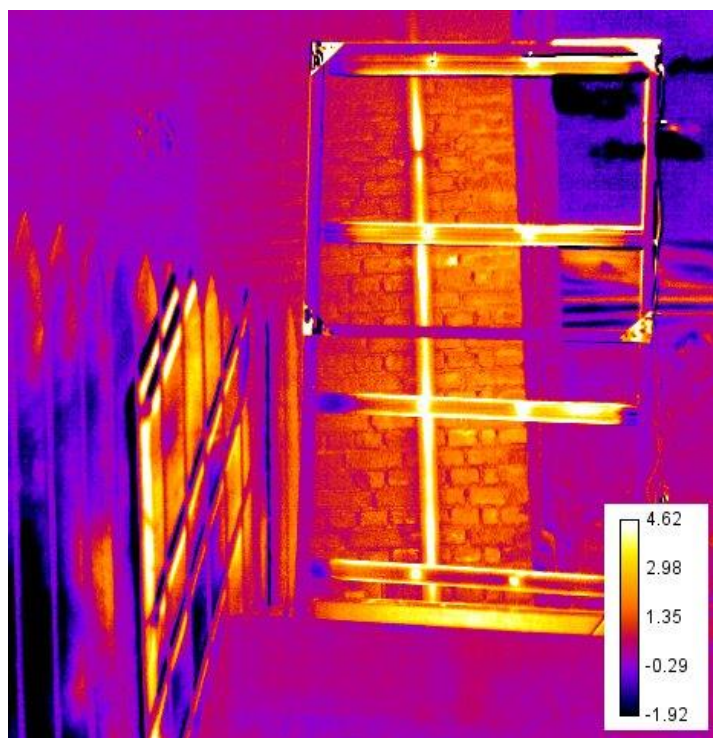
Figur 5.1-24: (a) - Visuelt bilde vegg 4, (b) - Temperatur før oppvarming

Temperaturen over vegg ved start nedkjøling av er presentert i figur 5.1-25 (a). Temperaturen på oppvarmet område varierer mellom 9,9°C og 14,5°C. Figuren under viser en tydelig temperaturstigning over fasaden sammenlignet med starttemperaturer. Temperaturene over fasaden ved slutt nedkjøling er presentert i figur 5.1-25 (b). Temperaturene er hentet ut etter 3 minutter nedkjøling. Termograferingen viser at temperaturene over fasaden varierer fra 9,2°C til 12,0°C.



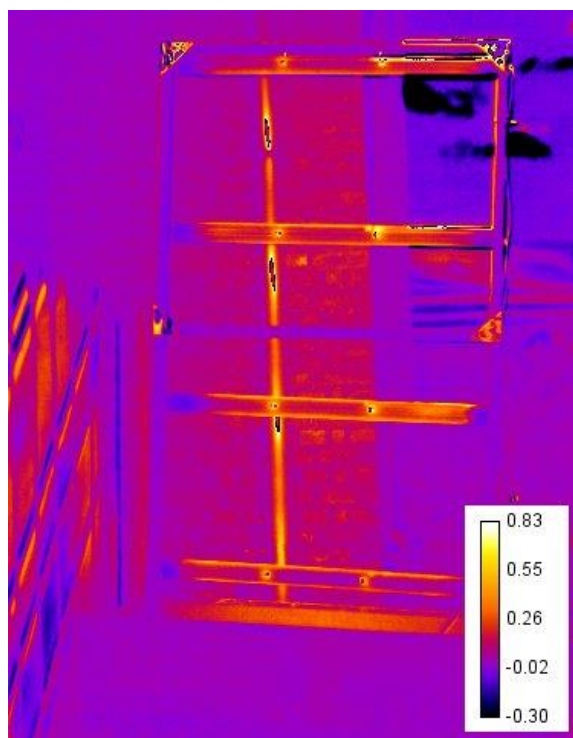
Figur 5.1-25: (a) - Start nedkjøling av vegg 4 aktiv termografering, (b) - Slutt nedkjøling av vegg 4 aktiv termografering

Temperaturvariasjonen som oppstår ved aktiv termografering på vegg 4, er presentert i figur 5.1-26. Figuren viser at det er en temperaturvariasjon over fasaden fra 0,5°C til 3,0°



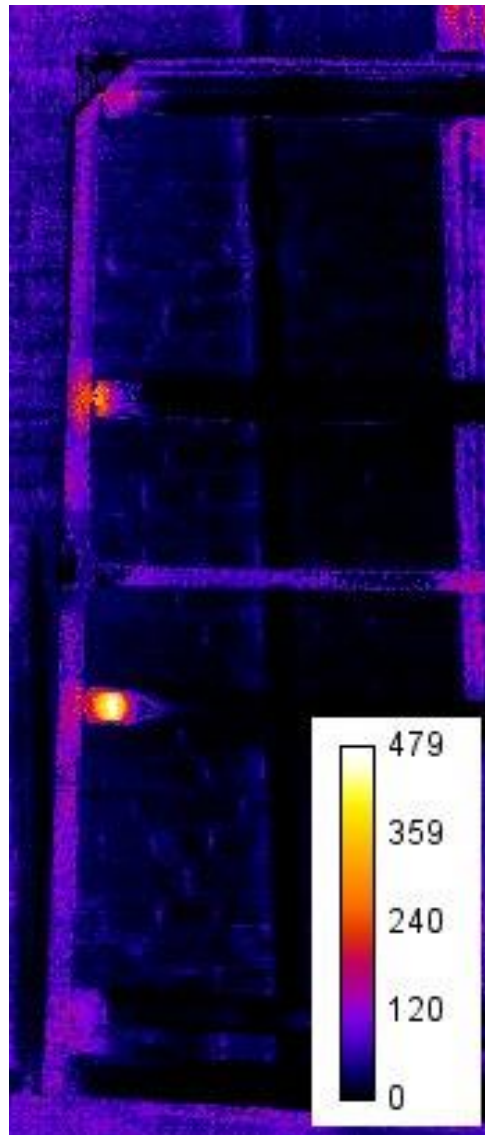
Figur 5.1-26: Temperaturendringen ved aktiv termografering vegg 4

Termisk fuktfaktor-kart for vegg 4 er presentert i figur 5.1-27. Verdiene for m varierer fra 0,05 til 0,2 innenfor gyldighetsområdet til kartet.



Figur 5.1-27: Temperaturendringen ved aktiv termografering vegg 4

Fuktkartet for veggen er presentert i figur 5.1-28. Fuktkartet indikerer at det er et fuktnivå på 0% i gyldighetsområdet til fuktkartet.



Figur 5.1-28: Fuktkart vegg 4 – Nord

Punktundersøkelsene utført under aktiv termografering er presentert i figur 5.1-29. Punktene er valgt ut ifra visuell undersøkelse under forsøk, med tilhørende verdier for fuktnivåer målt ved hjelp av håndholdte fuktmålere presentert i tabell 5.1-7.

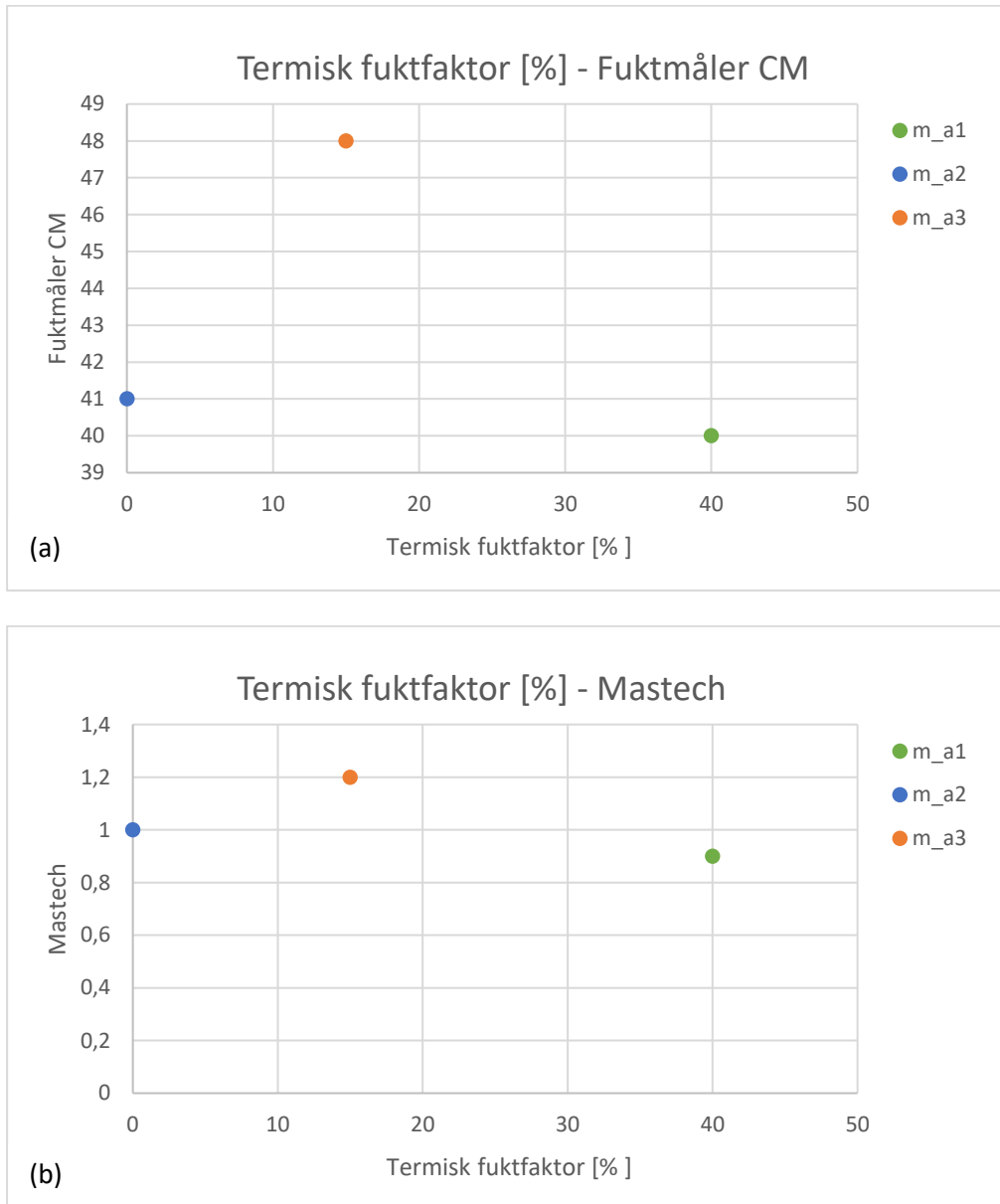
Verdiene for den termiske fuktfaktoren for punktene er presentert i tabell 5.1-7, verdiene varierer fra 0,06 til 0,14 og antyder at punktmålingene har et fuktnivå på mellom 0% og 40% i henhold til referanseverdier fra kapittel 4.3.4. Figur 5.1-30 (a) presenterer håndholdte målinger gjort med fuktmåler CM opp mot fuktnivået hentet ut ved den termiske fuktfaktoren. Figur 5.1-30 (b) presenterer fuktnivået målt med mastech fuktmåler opp mot den termiske fuktfaktoren.



Figur 5.1-29: Plassering av punktmålinger utført på vegg 4

Tabell 5.1-7: Punktmålinger utført vegg 4

Punkt:	Termisk fuktfaktor :	Fuktnivå [%]:	Mastech:	Fuktmåler CM:
m_a1 (1)	0,0596	40	0,9	40
m_a2 (2)	0,1416	0	1	41
m_a3 (3)	0,0969	15	1,3	48



Figur 5.1-30: Håndholdte fuktmålere mot termisk fuktfaktor vegg 4

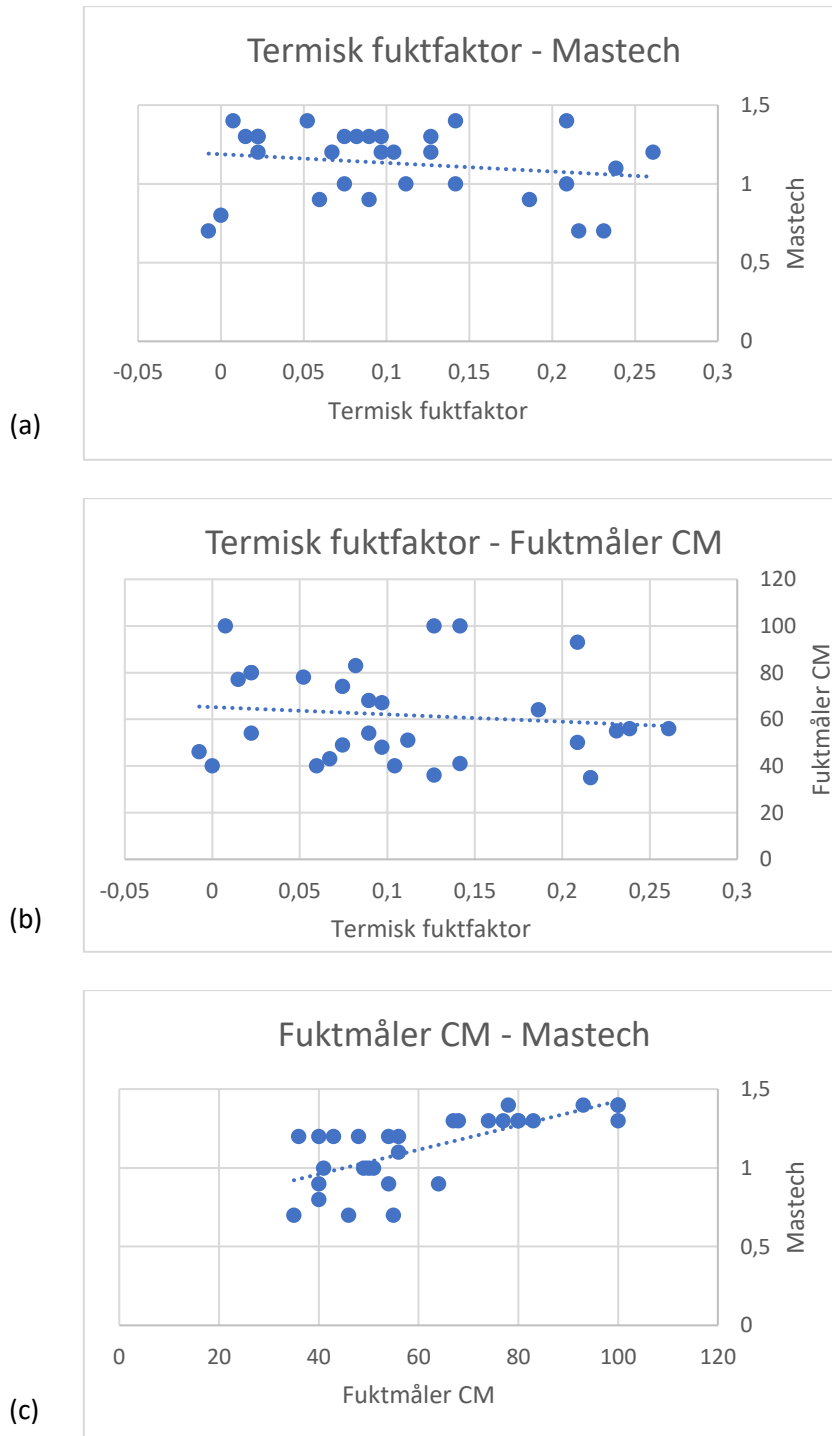
Solmålingene utført under feltforsøkene er oppgitt i tabell 5.1-8. Målingene viser at det er en lav påvirkning av kortbølget stråling og en normal påvirkning fra langbølget stråling. Snittet av kortbølget og langbølget innstråling er 58,93 W/m² og 342,01 W/m². Totalt absorbert stråling for teglstenen under feltforsøket er 47,70 W/m² for kortbølget stråling og -23,31 W/m² (netto reflektert) langbølget stråling.

Tabell 5.1-8: Solmåling utført ved aktiv termografering vegg 4

Målinger: [W/m ²]	Kortbølget stråling:	Reflektert kortbølget:	Langbølget stråling:	Reflektert langbølget	Absorbert kortbølget:	Absorbert langbølget:
Måling 1:	62,14	19,33	345,54	364,10	42,81	-18,56
Måling 2:	58,22	7,87	345,35	364,81	50,35	-19,46
Måling 3:	56,43	6,51	334,95	364,04	49,92	-29,09
Gjennomsnitt:	58,93	11,23	342,01	365,32	47,7	-23,31

5.1.5 Sammenstilling av håndholdte målinger

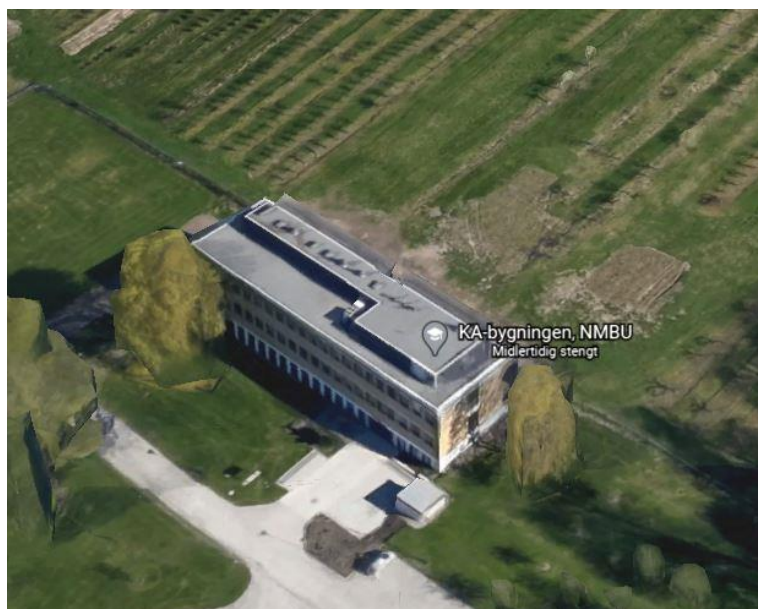
Sammenstillingen av målte verdier for termisk fuktfaktor sammenlignet med målinger fra håndholdte fuktmålere er presentert i figur 5.1-31. Graf (a) viser forholdet mellom målinger gjort med Mastech MS6900 og den termiske fuktfaktoren. Graf (b) presenterer forholdet mellom målinger gjort med fuktmåler CM og den termiske fuktfaktoren. Graf (c) viser sammenhengen med målingene utført med Mastech MS6900 og fuktmåler CM. Grafene viser at det er spredning i resultatene, trendlinjene i grafene viser at det er en korrelasjon mellom fuktnivåene målt med de respektive metodene.



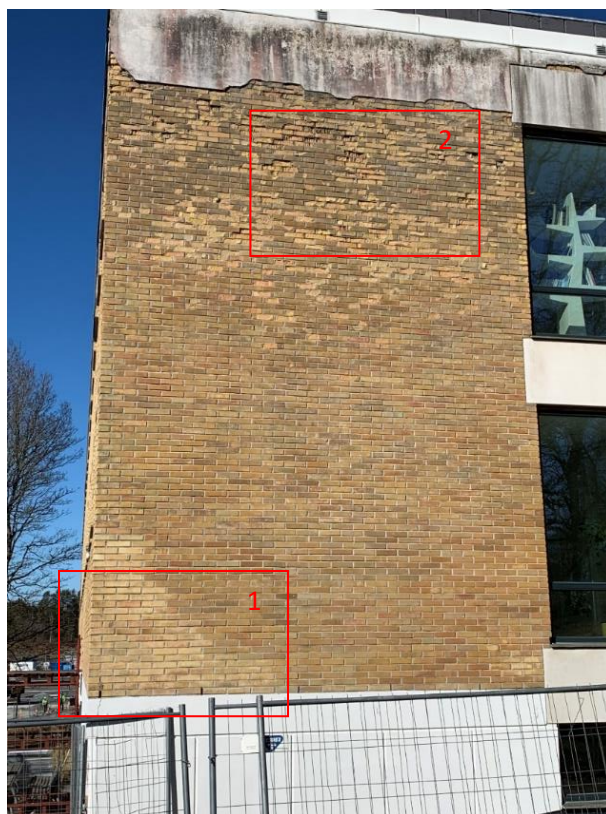
Figur 5.1-31: Håndholdte fuktmålinger mot målt termisk fuktfaktor

5.2 Passiv termografering av moderne teglsteinsfasade

Passiv termografering er utført på bygget presentert i figur 5.2-1 på fasaden presentert i figur 5.2-2. Veggen bærer preg av mekanisk slitasje og de store fargeforskjellene over veggen kan indikere at det er forskjeller i fuktnivået i fasaden. Uthevede områder i figur 5.2-1 presenterer fokusområder i fasaden, hvor område 1 antyder fuktforskjell og område 2 antyder mekanisk slitasje.



Figur 5.2-1: Bilde av KA-bygget (Earth).



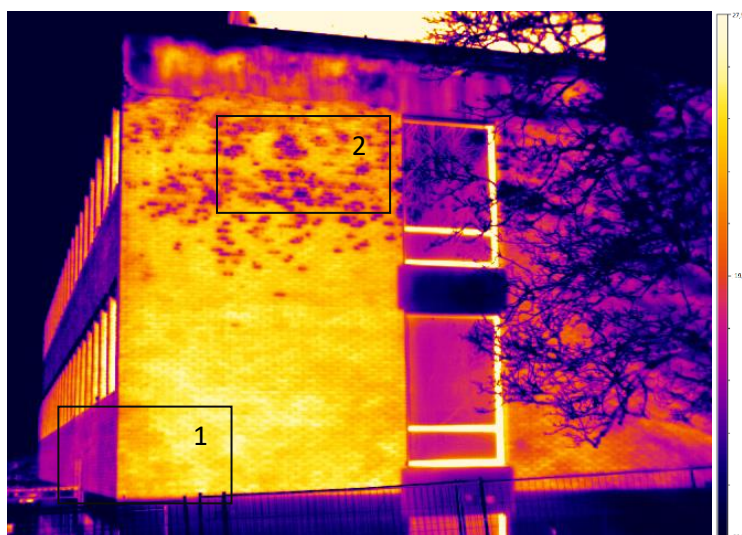
Figur 5.2-2: Visuell illustrasjon av sør-øst vegg KA-bygget ved NMBU

Termograferingen vist i Figur 5.2-3 viser at temperaturen på veggen til venstre for vinduene ligger mellom 0,3°C og 5,2°C ved start passiv termografering. Område 1 viser at temperaturen varierer etter fargeforskjellen i fasaden som vist i figur 5.2-2. Område 2 viser at temperaturen er lavere der det er tydelige mekaniske skader som vist i figur 5.2-2.



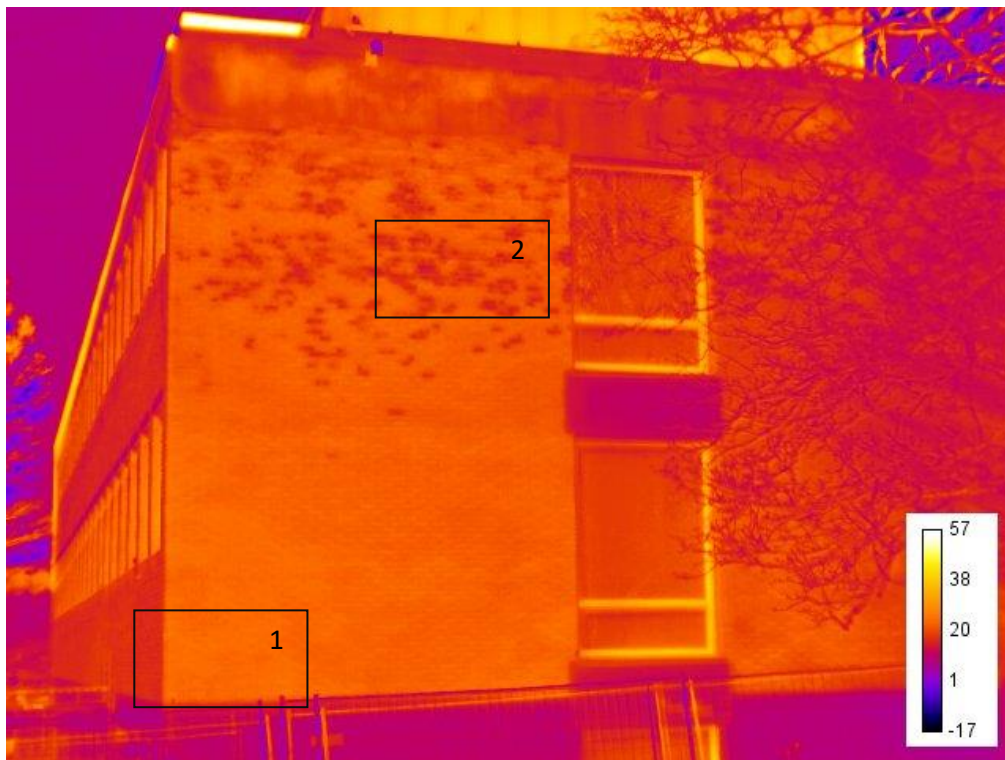
Figur 5.2-3: Termografering utført kl. 05:25. Start passiv termografering.

Figur 5.2-4 viser termografering utført midt på dagen etter påvirkning av sola fra soloppgang til kl. 12:00. Termograferingen kl. 12:00 viser at temperaturen til veggen varierer fra 14,4°C til 26,5°C.



Figur 5.2-4: Termografering utført kl 12:00. Slutt passiv termografering

Temperaturforskjellen over fasaden under passiv termografering er presentert i figur 5.2-5. Figuren viser at temperaturendringen over fasaden er jevn, endringen er $22,0^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Unntaket for den jevne temperaturstigningen er områdene med stor mekanisk skade hvor temperaturendringen er betydelig mindre.



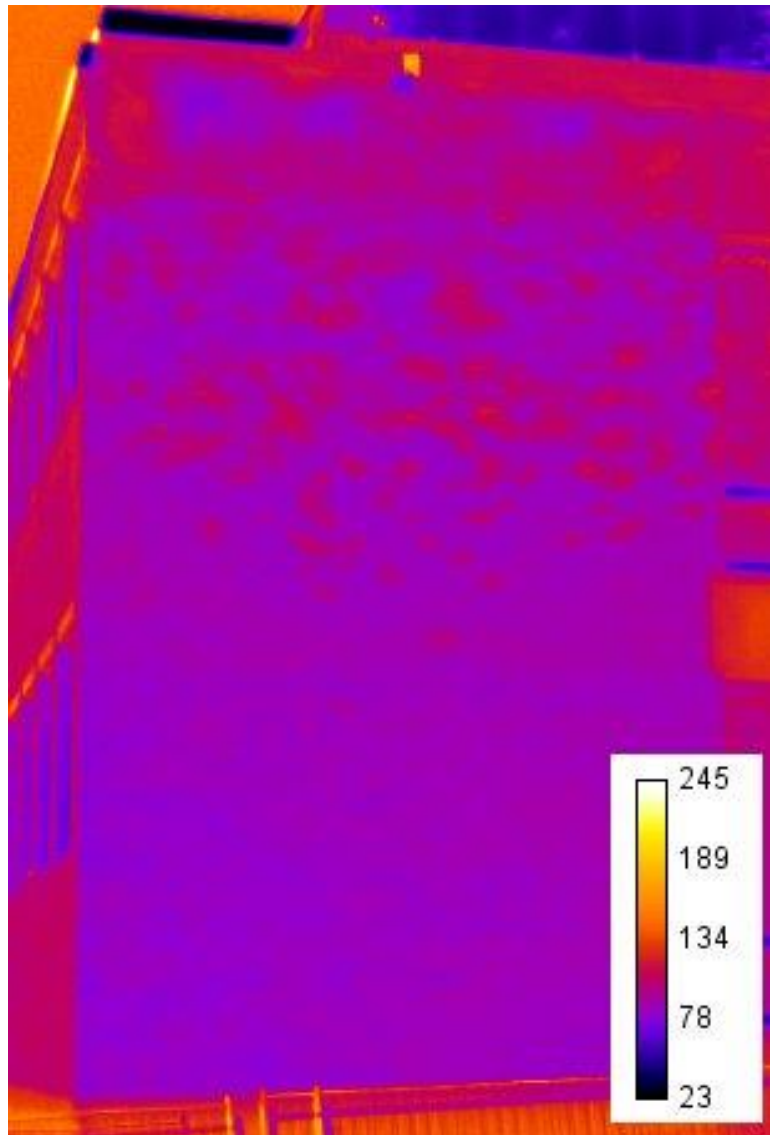
Figur 5.2-5: Temperaturendringen til fasaden under passiv termografering.

Termisk fuktfaktor-kart for vegg 1 er presentert i figur 5.2-6. Verdiene for m varierer fra 0,07 til 0,15 for snittet det er sett på.



Figur 5.2-6: Termisk fuktfaktor-kart ved passiv termografering

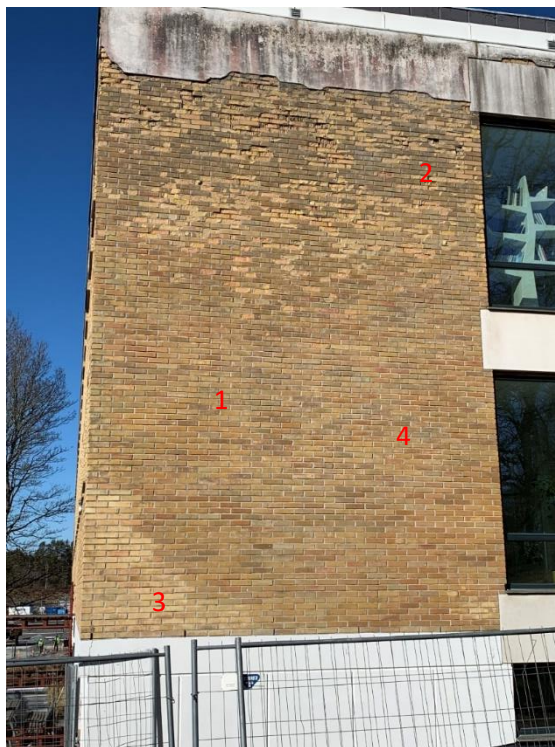
Fuktkartet for veggen er presentert i figur 5.2-7. Fuktkartet indikerer at det er et fuktnivå på mellom 70% og 100% for veggen.



Figur 5.2-7: fuktkart for vegg KA-bygget

Punktundersøkelsene utført under passiv termografering er presentert i figur 5.2-8. Punktene er valgt ut ifra visuell undersøkelse under forsøk.

Verdiene for den termiske fuktfaktoren for punktene er presentert i tabell 5.2-1, verdiene varierer fra 0,12 til 0,16 og antyder at punktmålingene har et fuktnivå på mellom 90% og 100% i henhold til referanseverdier for teoretisk termisk fuktfaktor for KA-bygget fra kapittel 4.3.4.



Figur 5.2-8: Plassering av punktmålinger ved passiv termografering

Tabell 5.2-1: Punktmålinger utført ved passiv termografering

Punkt:	Termisk fuktfaktor – m:	Fuktnivå [%]:
1	0,1338	100
2	0,1195	100
3	0,1605	90
4	0,1468	100

Solmålinger utført under termografering kl. 12:00 er presentert i tabell 5.2-2. Målingene dokumenterer kort- og langbølget stråling mot bygget. Metrologiske data under den passive termograferingen er presentert i figur 5.2-9, temperaturendringen i luften var 8°C og det var gode solforhold under termograferingen.

Tabell 5.2-2: Solmåling utført kl.1200 for passiv termografering.

Målinger: [W/m ²]	Kortbølget stråling:	Reflektert kortbølget:	Langbølget stråling:	Reflektert langbølget	Absorbert kortbølget:	Absorbert langbølget:
Måling 1:	997,02	165,02	292,93	382,51	832,00	-89,58
Måling 2:	776,17	190,59	352,68	378,88	585,58	-26,2
Måling 3:	713,64	187,24	354,18	376,26	526,4	-22,08
Gjennomsnitt:	828,94	180,95	333,60	379,22	647,99	-45,95



Figur 5.2-9: Meteorologiske data for passiv termografering (Yr.no, 2020).

6 Diskusjon

Dette kapitlet tar for seg diskusjonen rundt målinger, beregninger og oppnådde resultater. Diskusjonen tar for seg hovedpunktene rundt den aktive og passive termograferingen.

6.1 Aktiv termografering

Resultatene etter den aktive termograferingen viser at det er mulig å utarbeide et kart som viser fuktnivået i en del av en fasade. Utarbeidelsen av et kart gjør at man kan estimere fuktnivå over en fasade i en større grad enn håndmålere muliggjør i dag. Sammenligningen gjort mot punktmålinger i denne oppgaven viser at det er utviklingsmuligheter rundt nøyaktigheten til metoden.

Aktiv termografering i denne oppgaven er basert på avkjølingsperioden etter en ekstern oppvarming, i motsetning til Ludwig et al. som benytter oppvarmingsperioden for å estimere fuktinnholdet. Dette er for å redusere påvirkningen av at varmekilden ikke er homogen og kontrollerbar. Ved å benytte avkjølingsperioden reduseres påvirkningen av dette (Antonsen, 2020). Prosedyren for feltforsøk, hvor faktorer som oppvarmingstid, nedkjølingstid, avstander mellom varmeelementlamper og avstander mellom vegg og varmerigg ble testet og utviklet i den hensikt at målingen skal være mest mulig tidseffektiv. Prosedyren ble testet og utviklet på teglstein i laboratorium og ved feltforsøk på en testvegg av teglstein ved NMBU.

Varmekilden benyttet i varmeriggen stråler ikke jevnt fordelt over hele området til varmeriggen. Varmekildene har også en treghet i oppstart av den aktive termograferingen. Dette gjør at temperaturdifferansen til fasaden ved oppvarming påvirkes av strålingen til varmekilden, slik at strålingen er påvirkningsfaktor i tillegg til materialeegenskapene ved oppvarming. Hovedpunktet ved feltforsøkene er å hente ut temperaturdifferanse, noe som gjør det fordelaktig å ha varmekilde som stråler så homogent som mulig i testområdet ved aktiv termografering.

Effekten til lampene gjør også at feltforsøk er avhengig av mye strøm, den teoretiske effekten på 4kW benyttet i denne oppgaven gjør at man må ha tilgang til to 16 amperes kurser for å kunne utnytte hele varmeriggen. Dette reduserer bruksmulighetene til oppsettet, selv om antall varmekilder på riggen kan reduseres og tilpasses etter strømtilgangen.

Den teoretiske termisk fuktfaktor som er referansegrunlaget for data innhentet baseres på antagelser rundt materialfaktorer og målte verdier for stråling. Den teoretiske termiske fukt faktoren vil derfor vært mer nøyaktig hvis man kunne uthente nøyaktige materialfaktorer for den historiske teglsteinen. Materialdataene til teglsteinsfasaden varierer også internt i vegg. Teglstein fra 1840-tallet har og vil bli påvirket av ytre mekaniske faktorer, i kombinasjon med at gammel teglstein vil ha en variasjon i materialeegenskaper ettersom de ikke er produsert med moderne metoder.

Resultatkapitlet presenterer resultater hvor varmestativet er fjernet ved nedkjøling og når det ikke er fjernet. Utfra dette er det tydelig at å fjerne varmekilden etter oppvarming gir et ryddigere og bedre resultat. Dette aspektet ble ikke vurdert godt nok i utviklingen av prosedyren. Fjerning av varmerigg vil kreve at det settes en prosedyre for å kunne utføre dette likt hver gang, for å redusere feilkilder.

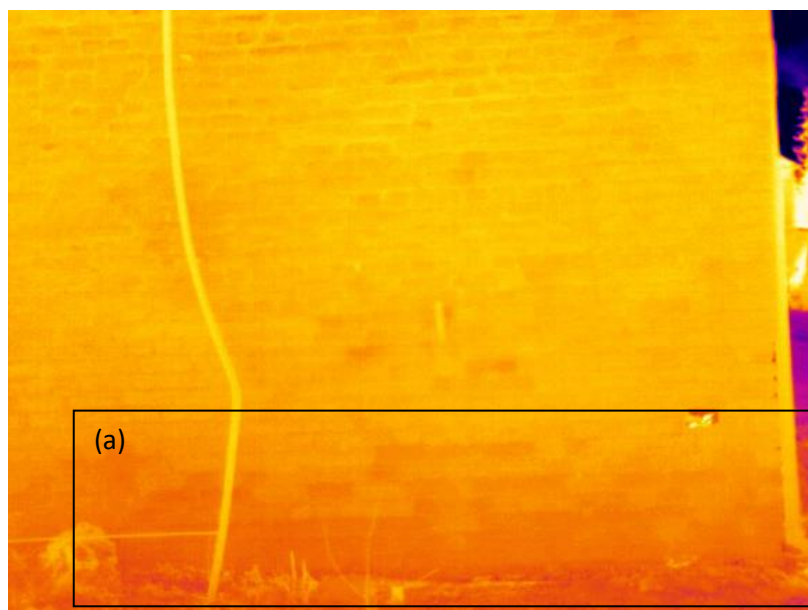
Termograferingen har som mål å kartlegge temperaturdifferanse mellom punkter. Dette gjør at benyttet emissivitet ikke i like stor grad trenger å være like nøyaktig som hvis målet er å kun måle rett temperatur. Ut ifra dette er det benyttet en anbefalt standardverdi for emissiviteten til teglstein hentet fra litteraturen.

Fuktmåling ved hjelp av håndholdte fuktmålere er ikke en nøyaktig teknologi. Håndholdte målere gir en rask og enkel indikasjon på fuktnivået i materialet. Variasjonen i målingene utført på teglstensfasaden bygger opp under dette. Sammenligningen av håndholdte målere og verdier for den termiske fuktfaktoren gir derfor ingen eksakt svar på om fuktnivået i fasaden er korrekt målt. Nøyaktigheten til de håndholdte instrumentene påvirkes også av brukerfeil, unøyaktighet og kalibreringen fra leverandør opp mot materialtypene.

For å kunne beregne fuktnivået i et materiale med høyere nøyaktighet er metoden ved hjelp av tørke og veiemetoden mest nøyaktige metoden, for å beregne fuktnivået i et materiale. Tørke og veiemetoden er en destruktiv metode, uttak av teglstein fra fasaden i St. Olavs Vold for å kunne definere fuktnivået i veggen er uaktuelt ettersom bygget er fredet. Dette gjør at fuktnivået som blir indikert ved de håndholdte fuktmålerne er det beste sammenligningsgrunnlaget. Grafene presentert i kapittel 5.1.5 underbygger at det er stor spredning i resultatene, til tross for dette kan man se at trendlinjen viser at det er en sammenheng mellom verdier utarbeidet ved aktiv termografering og de håndholdte målerne.

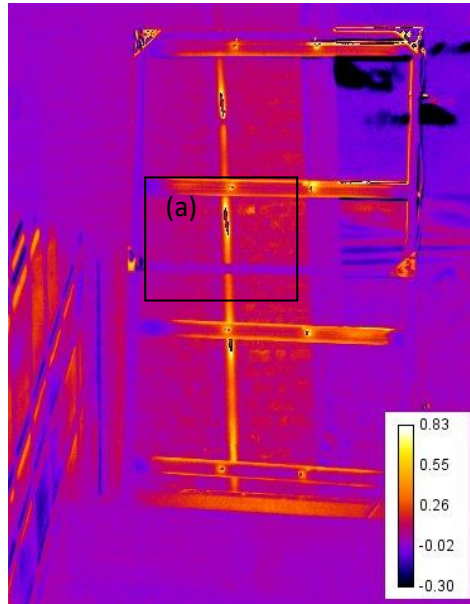
Sammenligningen av resultatene fra vegg 3 og de andre veggene viser at solpåvirkning som målt under testing av vegg 3 gir resultater som ikke kan benyttes. Forsøket utført viser at beregningen utført ved stor solpåvirkning gir verdier for den termiske fuktfaktoren som er lave, noe som gir fuktnivåer på opp mot 100%. Temperaturendringen forstyrres i stor grad av sterk solstråling, slik at den utregnede termiske fuktfaktoren blir ugyldig. Erfaringene og verdiene hentet ut ved aktiv termografering ved sterk solstråling bygger opp under om at metoden fungerer best uten påvirkning fra sterk solstråling. Fuktkartet for vegg 3 viser også at påvirkningene er for store til å kunne anslå fuktnivået i veggen. Kartet viser hvor riggen med varmekilden sto, og tegn til at det står et tre som skapte skyggeområder på fasaden.

Figur 6.1-1, uthevet område (a) viser områder som er i nærheten av bakken. Her kan man se at det er kjøligere områder enn høyere på veggen. Område (a) kan påvirkes av flere faktorer som skaper lavere temperatur. Kjøligere temperatur i bakken enn og fuktopptak fra bakken er to punkter som kan påvirke temperaturen. Dette gjør igjen at antagelsen om overgangsmotstand og temperaturforskjell ikke er like nøyaktig langs bakken i forhold til høyere på veggen.



Figur 6.1-1: Nedkjøling i tilknytning til bakken – vegg 2.

Termisk fuktfaktor-kart og fuktkart utarbeidet i denne oppgaven påvirkes av flere faktorer. Andre komponenter i fasaden og varmerigg er påvirkningsfaktorer skaper støy. Støyen gjør at nøyaktigheten til kartene reduseres ettersom områder påvirkes av andre faktorer. Figur 6.1-2, uthevet område (a), presenterer forstyrrelser fra takrenner og varmeovner.



Figur 6.1-2: Forstyrrelser i termisk fuktfaktor-kart.

6.2 Passiv Termografering

Passiv termografering benytter seg av oppvarmingen skapt av solstråling. Dette tilsier at varmekilden ikke kan kontrolleres og at solstråling er drivkraften bak kartleggingen. Utnyttelsen av solstråling gjør at større områder kan undersøkes, til tross for at man blir mer avhengig av direkte solstråling over et større tidsrom for å utføre termograferingen.

Utførelsen av passiv termografering i denne oppgaven ble utført på kun den halve sør-østlige veggen til KA-bygget. Grunnen til dette er at et tre står i nærheten av veggen som påvirker og hindrer passiv termografering på denne delen av veggen.

Det infrarøde kameraet fjernet mellom hver termografering, dette medførte at nøyaktigheten ved termograferingen reduseres ettersom flytting av kameraet mellom termograferingen betyr at de korresponderende pixlene for hver termografering ikke samsvarer. Behandlingen av termograferingen har derfor hatt som mål å få dataene til fra bildene til å samsvare i best mulig grad i tillegg til å utarbeide figurer som presenterer temperaturdifferanse og fukt betraktninger.

Metoden benyttet for å beregne termisk fuktfaktor ved aktiv termografering er overført til passiv termografering. Dette er gjort selv om det ikke er en kontrollert varmekilde og et mye lenger tidsperspektiv ved passiv termografering. Fuktkartet utarbeidet viser at beregningsgrunnlaget fungerer til å illustrere fuktfordelingen til veggen. Verdiene utregnet for den termiske fuktfaktoren gir fuktnivå for utvalgte punkter som er opp mot 100%. Fuktnivåer opp mot 100% er urealistisk for teglstein, som er et lite hydroskopisk materiale. De høye målte og utregnede verdiene for fuktnivået tilsier at nøyaktigheten til metoden kan diskuteres. Det er mange påvirkningsfaktorer ved utregningen av fukt i KA-bygget, ved bruk av mer nøyaktige materialegenskaper og strålingspåvirkning fra sola vil man kunne anta at nøyaktigheten heves.

Uthevet område 1 ble analysert på grunnlag av den tydelige fargeforskjellen i fasaden. Hjørnet nede til vestre i termograferingen er et tydelig distinkt lysere område enn store deler av resten av fasaden. Den store fargeforskjellen kan tyde på at det er et område med mindre fukt enn resten av de mørke områdene av fasaden. Termograferingen viser derimot at det ikke er noen tydelig temperaturforskjell om det er et mørkt eller lyst område på fasaden. Uthevet område 2 er et område som preges av stor mekanisk slitasje. Slitasjen kan komme fra flere årsaker som slagregn, frostspreng og dårlig kvalitet på tegl. Stor slitasje gjør at steinene endrer sine egenskaper. Dette kommer tydelig frem ved at det er store temperaturforskjeller fra resten av fasaden.

7 Konklusjon

Målet med denne oppgaven har vært å validere ikke-destruktiv feltmåling av fukt i teglsteinsfasader ved hjelp av termografering. For å svare på dette er det utført aktiv termografering på en historisk teglsteinsfasade ved St. Olavs Vold i Sarpsborg og passiv termografering på KA-bygget ved NMBU i Ås.

Feltforsøkene utført ved hjelp av aktiv termografering på den historiske teglstensfasaden viser at det er mulig å utarbeide et fuktkart for et gitt område. Muligheten til å kunne kartlegge større områder bidrar til enklere kartlegging i større grad enn hjelp av håndholdte målere. Sammenligningen opp mot håndholdte måler viser at det er spredning i resultatene, dette gjør det vanskelig å anslå eksakt fuktnivå i fasaden. Verdiene hentet ut med feltmålingene samsvarer med den teoretiske kurven for den termiske fuktfaktoren utregnet for den historiske teglsteinsfasaden. Dette viser at det er samsvar mellom den teoretiske modellen og feltforsøk ved bruk av riktige materialfaktorer og solstråling. Ved anvendelse av eksakte verdier for teglsteinen vil man kunne oppnå bedre nøyaktighet for metoden enn ved bruk av standardverdier. Utførelse av aktiv termografering ved direkte solstråling skaper store forstyrrelser, metoden egner seg ikke ved direkte solstråling.

Konverteringen av termisk fuktfaktor fra aktiv til passiv termografering ga varierende verdier, hvor med de antagelsene og materialeegenskapene benyttet i denne oppgaven ga verdier med urealistisk høye fuktverdier. Bedre kartlegging av stråling er viktig for å kunne utarbeide riktig kurve for den teoretiske termiske fuktfaktoren.

Det finnes store muligheter ved bruk av infrarød termografering, men som presentert i denne oppgaven er nøyaktigheten en faktor som må videreutvikles. Denne oppgaven og teorigrunnlaget den er basert på viser at aktiv termografering er en mer nøyaktig måte å måle fukt i teglsteinsfasader enn passiv termografering.

7.1 Videre arbeid

Oppnådde resultater i denne oppgaven indikerer at videre arbeid er nødvendig for å øke nøyaktigheten ved bruk av aktiv termografering for å kartlegge fuktnivået. Et steg kan være å se på videre utvikling av varmekilden, herunder å se på lamper med mer homogen stråling over hele arealet eller å se på punktoppvarming ved hjelp av andre varmekilder. Videre kan temperaturendringen over fasaden istedenfor tid som parameter ses på i arbeidet for å beregne den termiske fuktfaktoren. Til slutt kunne det vært interessant å se på hvordan feltforsøk lar seg utføre om sommeren, hvor de meteorologiske forholdene er forskjellig fra vinterperioden hvor forsøkene i denne oppgaven ble utført.

8 Referanser

- Albedo. (2018). 2020 (28.02). Tilgjengelig fra: <https://snl.no/albedo>.
- Antonsen, M. (2020). *Ikke-destruktive laboratoriemålinger av fukt i byggematerialer ved hjelp av aktiv termografering*: NMBU.
- Avdelidis, N. P. & Moropoulou, A. (2004). Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. *Journal of Cultural Heritage*, 5 (1): 119-127. doi: 10.1016/j.culher.2003.07.002.
- Baehr, H. D. & Stephan, K. (2011). *Heat and Mass Transfer*. Berlin, Heidelberg: Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Barreira, E. & Almeida, R. M. S. F. (2019). *Infrared Thermography for Building Moisture Inspection*. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Cham: Springer International Publishing, Cham.
- Bienvenido-Huertas, D., Bermúdez, J., Moyano, J. J. & Marín, D. (2019). Influence of ICHTC correlations on the thermal characterization of façades using the quantitative internal infrared thermography method. *Building and Environment*, 149: 512-525. doi: 10.1016/j.buildenv.2018.12.056.
- Biltema. (2017). Fuktmåler - manual. Tilgjengelig fra: https://www.biltema.no/BiltemaDocuments/Manuals/15-340_man.pdf.
- Blaine, R. (2018). In search of thermal effusivity reference materials. *An International Forum for Thermal Studies*, 132 (2): 1419-1422. doi: 10.1007/s10973-018-7020-6.
- Breitenstein, O., Warta, W. & Schubert, M. C. (2018). *Lock-in Thermography : Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials*. Third edition. utg., b. 10. Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer.
- Bøhlerengen, T. (2018). 421.132 Fukt i bygninger. Teorigrunnlag (). Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/184/fukt_i_bygninger_teorigrunnlag#i25.
- Cableizer. (2020). *Solar radiation Calculator*. Tilgjengelig fra: https://www.cableizer.com/tools/solar_radiation/ (lest 06.05).
- D'Accardi, E., Palumbo, D., Tamborrino, R., Cavallo, P. & Galietti, U. (2018, 2018). *Pulsed Thermography: evaluation and quantitative analysis of defects through different post-processing algorithms*: QIRT Council.
- Earth, G. *KA-bygget, NMUB, Ås*.
- Edvardsen, K. I. & Ramstad, T. Ø. (2014). *Trehus*. [10. utg.]. utg. SINTEF byggforsk håndbok (trykt utg.), b. 5. Oslo: SINTEF akademisk forl.
- Edvardsen, K. I. (2016). 770.007 Eldrebyggevarer. Sement, betong, betongprodukter, mørtler, naturstein og keramiske fliser. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/3343/eldre_byggevarer_sement_betong_betongprodukter_moertler_naturstein_og_keramiske_produkter#i72 (lest 10.02.2020).
- Edvardsen, K. I. (2017). 770.115 Leire som byggemateriale. Muring, pussing og annen bruk *byggforskserien* Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/3160/leire_som_byggemateriale_muring_pussing_og_annen_bruk (lest 11.02.2020).
- Fraunhofer-IBP - Holzkirchen, G. Solid brick, historical I: *Fraunhofer-IBP - Holzkirchen, Germany*
- 4.1IBP Pro WUFI
- Georges, M., Srajbr, C., Menner, P., Koch, J. & Dillenz, A. (2018). Thermography and Shearography Inspection of Composite Hybrid Sandwich Structure Made of CFRP and GFRP Core and Titanium Skins. *Proceedings*, 2 (8): 484. doi: 10.3390/ICEM18-05384.
- Geving, S. & Thue, J. V. (2002). *Fukt i bygninger*. Håndbok (Norges byggforskningsinstitutt : trykt utg.), b. 50. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.
- Grøn, Ø. (2019a). *Infrarød stråling*. snl.no: store norske leksikon. Tilgjengelig fra: https://snl.no/infrar%C3%B8d_str%C3%A5ling (lest 30.01).

- Grøn, Ø. (2019b). *Svart legeme* Snl.no: Store norske leksikon Tilgjengelig fra: [https://snl.no/svart legeme](https://snl.no/svart_legeme) (lest 31.01).
- Hisdal, J.-M. & Kvande, T. (2011). 571.201 Murverk. Materialer, typer og egenskaper Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/574/murverk materialer typer og egenskaper#i2](https://www.byggforsk.no/dokument/574/murverk_materialer_typer_og_egenskaper#i2) (lest 11.02.2020).
- Hola, A. (2017). Measuring of the moisture content in brick walls of historical buildings - the overview of methods *IOP Conference Series: Material Science and Engineering* doi: 10.1088/1757-899X/251/1/012067/meta.
- Holme, J. & Geving, S. Unngå byggskader: Reduser risikoen for mugg- og råtesopp *ByggAktuelt*, 3 (10). Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/globalassets/upload/artikkel-03-10-byggaktuelt.pdf> (lest 16.03.2020).
- Holøs, S. (2015). 474.531 Fuktmåling i bygninger. Instrumenter og metoder. *Byggforskserien*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/226/fuktmaaling i bygninger instrumenter og metoder#i5](https://www.byggforsk.no/dokument/226/fuktmaaling_i_bygninger_instrumenter_og_meto_der#i5) (lest 12.02.2020).
- ImageJ. (2011). *ImageJ - Documentation* imagej.nih.gov: ImageJ. Tilgjengelig fra: <https://imagej.nih.gov/ij/index.html> (lest 31.03).
- ImageJ. (2020). *What is Fiji*. imagej.net. Tilgjengelig fra: [https://imagej.net/Introduction#What is Fiji.3F](https://imagej.net/Introduction#What_is_Fiji.3F) (lest 31.03).
- Jacobsen, S. (1999). 520.067 Frostnedbrytning av betong og andre porøse byggematerialer. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/2624/frostnedbrytning av betong og andre poroese byggematerialer#i01](https://www.byggforsk.no/dokument/2624/frostnedbrytning_av_betong_og_andre_poroese_byggematerialer#i01).
- Kvande, T. (2007). 542.003 Totrinnstetning mot slagregn på fasader. Luftede kledninger og fuger.
- Kvande, T. & Lisø, K. R. (2010). 700.110 Byggskader. Oversikt. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/629/byggskader oversikt#historicalDocuments](https://www.byggforsk.no/dokument/629/byggskader_oversikt#historicalDocuments) (lest 16.03.2020).
- Kvande, T., Lisø, K. R. & Hygen, H. O. (2013). 451.031 Klimadata for dimensjonering av regnpåkjennning. *Byggforskserien*.
- Kylili, A., Fokaides, P. A., Christou, P. & Kalogirou, S. A. (2014). Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. *Applied Energy*, 134: 531-549. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.08.005.
- Larsen, K. E. (2008). 542.645 Kledning av ubehandlet tre. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/3345/kledninger av ubehandlet tre#i13](https://www.byggforsk.no/dokument/3345/kledninger_av_ubehandlet_tre#i13) (lest 14.02.2020).
- Lawrence, M. G. (2005). The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air: A Simple Conversion and Applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86 (2): 225-234. doi: 10.1175/bams-86-2-225.
- Lillestøl, E., Hunderi, O., Lien, J. R., Løvhøiden, G. & Lillestøl, E. (2001). *Varmelære og elektromagnetisme*, b. B. 2. Oslo: Universitetsforl.
- Ludwig, N., Redaelli, V., Rosina, E. & Augelli, F. (2004). Moisture detection in wood and plaster by IR thermography. *Infrared Physics and Technology*, 46 (1-2): 161-166. doi: 10.1016/j.infrared.2004.03.020.
- Madsø, F. E. (2001). *Tegl og teglmurverk, materialeegenskaper*. Murkatalogen 2001, anvisning M1. mur-sentret.no: murbransjens forsknings- og informasjonskontor Tilgjengelig fra: <https://docplayer.me/2207354-Tegl-og-teglmurverk-materialeegenskaper-definisjoner-2.html> (lest 03.04.2020).
- Magnussen, K. (red.). (2007). 720.082 Råte- og fargeskadesopp. *Skadetyper og utbedring byggforsk: SINTEF*.

- Maierhofer, C., Arndt, R., Röllig, M., Rieck, C., Walther, A., Scheel, H. & Hillemeier, B. (2006). Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, 28 (4): 393-401. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2006.02.011.
- Maierhofer, C. & Roellig, M. (2009). Active thermography for the characterization of surfaces and interfaces of historic masonry structures. (lest 10.01.2020).
- Mastech. (2017). *MS6900 - Moisture tester* Tilgjengelig fra: <http://www.mastech-group.com/products.php?cate=114&PNo=106#> (lest 24.03.2020).
- Meteorologisk_institutt. (2017). *Det blir våtere* met.no: Metrologisk institutt Tilgjengelig fra: <https://www.met.no/vaer-og-klima/det-blir-vatere> (lest 05.03.2020).
- museum, B.
- ndt.no. *NDT metoder*. Norsk Forening for ikke-destruktiv Prøving. Tilgjengelig fra: <http://ndt.no/index.php?topmenu=814&expand=814&show=814> (lest 24.02.2020).
- Optris. Optris PIX connect software for Thermal imager Tilgjengelig fra: <https://www.optris.com/optris-pi-connect> (lest 10.02.2020).
- Optris. (2014). *Technical details of the optris PI 640*: Optris infrared measurements. Tilgjengelig fra: <https://www.optris.global/thermal-imager-optris-pi-640> (lest 10.02.2020).
- Optris. (-). Basic Principles of non-contact temperature measurement Tilgjengelig fra: <https://www.optris.global/calibration-source> (lest 11.05.2020).
- Ormestad, H. & Bedersen, B. (2019). Varmeledning. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/varmeledning> (lest 20.03.2020).
- Pedersen, B. (2017). *Varmestråling*. Leksikon. snl.no: Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/varmestr%C3%A5ling> (lest 30.01.2020).
- Pedersen, B. (2019). Varmekapasitet Tilgjengelig fra: <https://snl.no/varmekapasitet> (lest 20.03.2020).
- Petersson, B.-Å. (2013). *Tillampad byggnadsfysik*. I, s. 502: Studentlitteratur
- Poblete, A. & Acebes Pascual, M. (2007). Thermographic measurement of the effect of humidity in mortar porosity. *Infrared Physics & Technology*, 49 (3): 224-227. doi: 10.1016/j.infrared.2006.06.009.
- Ramstad, T. (2016). 571.523 Trevirke. Treslag og materialegenskaper. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/578/trevirke_treslag_og_materialegenskaper#i92 (lest 21.02.2020).
- Schwarz, K., Heitkötter, J., Heil, J., Marschner, B. & Stumpe, B. (2018). The potential of active and passive infrared thermography for identifying dynamics of soil moisture and microbial activity at high spatial and temporal resolution. *Geoderma*, 327: 119-129. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.04.028.
- Shull, P. J. (2001). Introduction to NDE. I: Shull, P. J. (red.) *Nondestructive Evaluation*. Boca Raton: CRC Press
- StandardNorge. (2000). Hygrotermiske egenskaper ved byggematerialer og -produkter. Bestemmelse av fuktinnhold ved tørking ved forhøyet temperatur Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=143648>.
- Sørbel, L. (2009). Frostsprengning. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/frostsprengning> (lest 12.02.2020).
- testing, T. A. s. f. n. (2020). *What is Nondestructive testing?*. asnt.org: The American society for nondestructive testing. Tilgjengelig fra: https://www.asnt.org/MajorSiteSections/About/Introduction_to_Nondestructive_Testing.aspx (lest 20.01.2020).
- Thiis, T. K., Burud, I., Flø, A. S., Kraniotis, D., Charisi, S. & Stefansson, P. (2017). Monitoring and simulation of diurnal surface conditions of a wooden facade.
- UIO. (2019). *Solstråling*. uio.no: Universitetet i Oslo. Tilgjengelig fra: <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/s/solstraaling.html> (lest 14.04.2020).

- Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., Molleda, J. & Bulnes, F. (2014). Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing. *Sensors*, 14 (7): 12305-12348. doi: 10.3390/s140712305.
- Use of the handheld apogee data logger (2019).
- Young, H. D. & Freedman, R. A. (2015). Sears and Zemansky's university physics with modern physics. I: b. 14 s. 569 - 608: Pearson Education Limited
- Yr.no. (2020). *Historikk Ås (NMBU)*. I: insitutt, M. & NRK (red.). Tilgjengelig fra: [https://www.yr.no/nb/historikk/graf/5-17850/Norge/Viken/%C3%85s/%C3%85s%20\(NMBU\)?q=2020-03-19](https://www.yr.no/nb/historikk/graf/5-17850/Norge/Viken/%C3%85s/%C3%85s%20(NMBU)?q=2020-03-19) (lest 20.03).
- Zdunkowski, W., Trautmann, T. & Bott, A. (2007). *Radiation in the Atmosphere*: United Kingdom: Cambridge University Press.

9 Vedlegg

9.1 Termisk effusivitet

$$e = \frac{1}{1+W} \sqrt{(k_w \rho C_{pw})W^3 + (k_w \rho C_p + k_p C_{pw} + k_w \rho C_{pw})W^2 + (k_p C_p + k_w \rho C_p + k_p C_{pw})W + k_p C_p}$$

9.2 Teoretisk termisk fuktfaktor

9.2.1 Historisk teglstein St. Olavs Vold

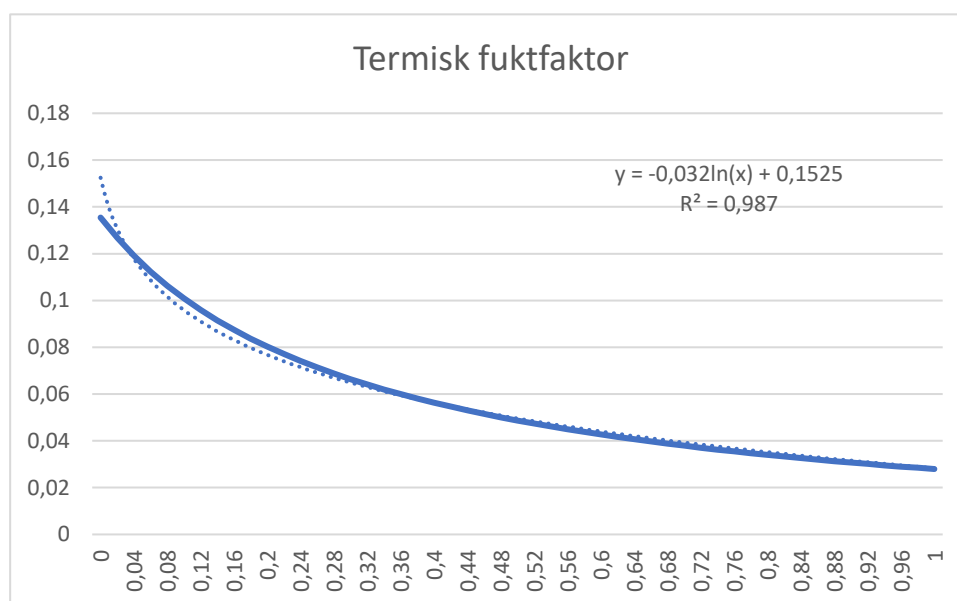
Verdier utregnet for historisk teglstein etter formler oppgitt i kapittel 2.7 med materialfaktorer fra kapittel 4.3.4.

W	Vanninnhold	Cp	K	ρ	e	Q	m
0	0 %	850,0	0,600	1800	958,123165	115	0,1354352
0,05	5 %	1008,6	0,661	1890	1122,47519	115	0,11560488
0,1	10 %	1152,7	0,725	1980	1286,27826	115	0,100883
0,15	15 %	1284,3	0,792	2070	1450,8663	115	0,08943871
0,2	20 %	1405,0	0,862	2160	1617,02928	115	0,08024815
0,25	25 %	1516,0	0,934	2250	1785,25996	115	0,07268611
0,3	30 %	1618,5	1,010	2340	1955,87595	115	0,06634552
0,35	35 %	1713,3	1,089	2430	2129,08568	115	0,06094804
0,4	40 %	1801,4	1,170	2520	2305,02665	115	0,05629592
0,45	45 %	1883,4	1,255	2610	2483,78866	115	0,05224422
0,5	50 %	1960,0	1,343	2700	2665,42867	115	0,04868395
0,55	55 %	2031,6	1,433	2790	2849,98051	115	0,0455314
0,6	60 %	2098,8	1,526	2880	3037,46147	115	0,04272107
0,65	65 %	2161,8	1,623	2970	3227,87688	115	0,04020092
0,7	70 %	2221,2	1,722	3060	3421,22336	115	0,03792901
0,75	75 %	2277,1	1,824	3150	3617,4911	115	0,03587116
0,8	80 %	2330,0	1,930	3240	3816,6656	115	0,03399921
0,85	85 %	2380,0	2,038	3330	4018,7289	115	0,03228971
0,9	90 %	2427,4	2,149	3420	4223,66053	115	0,03072302
0,95	95 %	2472,3	2,263	3510	4431,43819	115	0,0292825
1	100 %	2515,0	2,380	3600	4642,03835	115	0,02795401

Dokumentasjon av Q, utregnet med formler fra 2.7 og strålingsdata fra kapittel 4.3.4

Enhet:	Forklaring:	Verdi:	Enhet:
R _{sc}	Varmeovergangskonstant:	0,04	m ² K/W
ΔT	oppvarmet - lufttemp	3	K
Q	Avkjøling	75	W/m ²
Q	Målt	40	W/m ²
Q	Totalt	115	W/m ²

Kurve for den teoretisk termiske fuktfaktoren



9.2.2 Teglstein KA-bygget

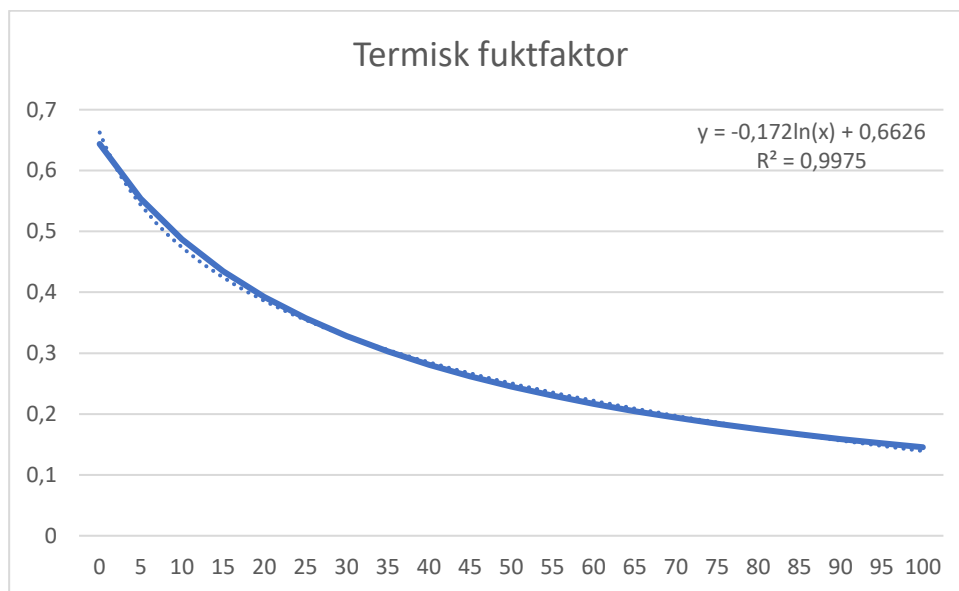
Verdier for teglstein utregnet etter formler oppgitt i kapittel 2.7 med materialfaktorer fra kapittel 4.3.4.

W	Vanninnhold	Cp	K	ρ	e	Q	m
0	0 %	850,0	0,900	1750	1157,04365	660	0,64364923
0,05	5 %	1008,6	0,976	1838	1344,88872	660	0,5537486
0,1	10 %	1152,7	1,055	1925	1529,97487	660	0,48675979
0,15	15 %	1284,3	1,137	2013	1714,14095	660	0,43446267
0,2	20 %	1405,0	1,222	2100	1898,50752	660	0,39227143
0,25	25 %	1516,0	1,309	2188	2083,79818	660	0,35739078
0,3	30 %	1618,5	1,400	2275	2270,49955	660	0,32800282
0,35	35 %	1713,3	1,494	2363	2458,94851	660	0,30286533
0,4	40 %	1801,4	1,590	2450	2649,38302	660	0,28109573
0,45	45 %	1883,4	1,690	2538	2841,97344	660	0,26204687
0,5	50 %	1960,0	1,793	2625	3036,84252	660	0,24523176
0,55	55 %	2031,6	1,898	2713	3234,07881	660	0,23027585
0,6	60 %	2098,8	2,006	2800	3433,74571	660	0,21688567
0,65	65 %	2161,8	2,118	2888	3635,88792	660	0,20482761
0,7	70 %	2221,2	2,232	2975	3840,536	660	0,1939131
0,75	75 %	2277,1	2,349	3063	4047,70971	660	0,18398806
0,8	80 %	2330,0	2,470	3150	4257,42049	660	0,17492523
0,85	85 %	2380,0	2,593	3238	4469,67332	660	0,1666185
0,9	90 %	2427,4	2,719	3325	4684,46816	660	0,15897861
0,95	95 %	2472,3	2,848	3413	4901,801	660	0,15192992
1	100 %	2515,0	2,980	3500	5121,66477	660	0,14540785

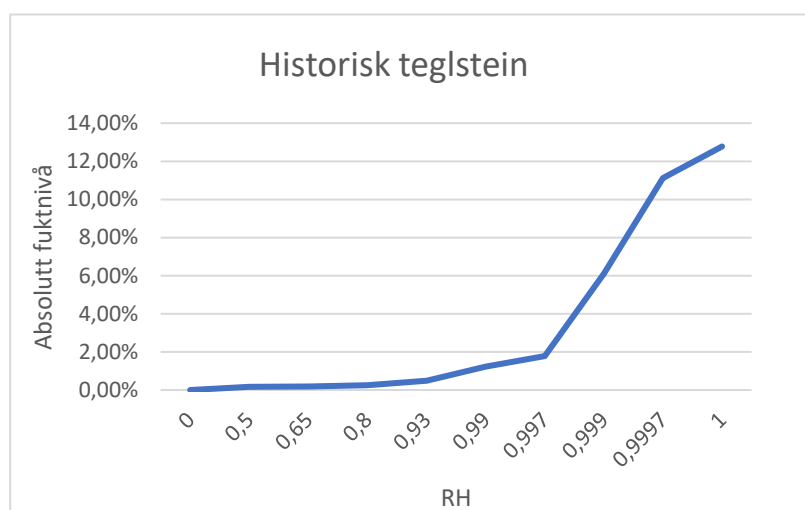
Dokumentasjon av Q, utregnet med formler fra 2.7 og strålingsdata fra kapittel 4.3.4

Enhet:	Forklaring:	Verdi:	Enhet:
Q	solstråling	660	W/m ²
Q	Totalt:	660	W/m ²

Kurve for den teoretisk termiske fuktfaktoren.



9.3 Sorpsjonskurve historisk teglstein





Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway